

IN RE APPLICATION OF: Tomoko OHTSUKI, et al.

SERIAL NO.: NEW U.S. PCT APPLICATION

FILED: HERewith

INTERNATIONAL APPLICATION NO.: PCT/JP00/05875

INTERNATIONAL FILING DATE: 30 August 2000

FOR: LIGHT SOURCE UNIT AND WAVELENGTH STABILIZING CONTROL METHOD, EXPOSURE APPARATUS AND EXPOSURE METHOD, METHOD OF MAKING EXPOSURE APPARATUS, AND DEVICE MANUFACTURING METHOD AND DEVICE

**REQUEST FOR PRIORITY UNDER 35 U.S.C. 119**  
**AND THE INTERNATIONAL CONVENTION**

Assistant Commissioner for Patents  
 Washington, D.C. 20231

Sir:

In the matter of the above-identified application for patent, notice is hereby given that the applicant claims as priority:

<u>COUNTRY</u>	<u>APPLICATION NO.</u>	<u>DAY/MONTH/YEAR</u>
JAPAN	11/257969	10 September 1999
JAPAN	11/258089	10 September 1999
JAPAN	11/259615	13 September 1999
JAPAN	2000/153320	24 May 2000
JAPAN	2000/190826	26 June 2000

A certified copy of the corresponding Convention application(s) was submitted to the International Bureau in PCT Application No. **PCT/JP00/05875**. Receipt of the certified copy(s) by the International Bureau in a timely manner under PCT Rule 17.1(a) has been acknowledged as evidenced by the attached PCT/IB/304.

Respectfully submitted,  
 OBLON, SPIVAK, McCLELLAND,  
 MAIER & NEUSTADT, P.C.

**22850**

Marvin J. Spivak  
 Attorney of Record  
 Registration No. 24,913  
 Surinder Sachar  
 Registration No. 34,423

(703) 413-3000  
 Fax No. (703) 413-2220  
 (OSMMN 1/97)



PCT/JP00/05875

30.08.00

日本国特許庁

PATENT OFFICE  
JAPANESE GOVERNMENT

REC'D 20 OCT 2000

WIPO

PCT

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出願年月日  
Date of Application:

1999年 9月10日

EXU

出願番号  
Application Number:

平成11年特許願第257969号

出願人  
Applicant(s):

株式会社ニコン

09/831345

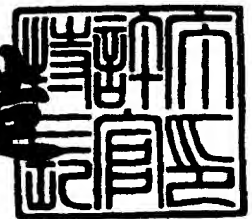
PRIORITY  
DOCUMENT

SUBMITTED OR TRANSMITTED IN  
COMPLIANCE WITH RULE 17.1(a) OR (b)

2000年10月 6日

特許庁長官  
Commissioner,  
Patent Office

及川耕造



出証番号 出証特2000-3080881

【書類名】 特許願  
 【整理番号】 99-00998  
 【あて先】 特許庁長官殿  
 【国際特許分類】 H01L 21/027  
 【発明者】

【住所又は居所】 東京都千代田区丸の内 3 丁目 2 番 3 号 株式会社 ニコ  
 ン内

【氏名】 大槻 朋子

【発明者】

【住所又は居所】 東京都千代田区丸の内 3 丁目 2 番 3 号 株式会社 ニコ  
 ン内

【氏名】 渥美 二一

【特許出願人】

【識別番号】 000004112

【氏名又は名称】 株式会社 ニコン

【代理人】

【識別番号】 100102901

【弁理士】

【氏名又は名称】 立石 篤司

【電話番号】 042-739-6625

【手数料の表示】

【予納台帳番号】 053132

【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】

【物件名】 明細書 1

【物件名】 図面 1

【物件名】 要約書 1

【包括委任状番号】 9408046

【プルーフの要否】 要



【書類名】 明細書

【発明の名称】 光源装置、露光装置及び露光方法、並びにデバイス及びその製造方法

【特許請求の範囲】

【請求項 1】 単一波長の光を発生する光源装置であって、

単一波長の光を発生する光発生部と；

前記光発生部の出力段に並列に配置された複数の光ファイバから成るファイバ群と；

前記各光ファイバからの光出力を個別にオン・オフすることにより前記ファイバ群から出力される光の光量を制御する光量制御装置とを備える光源装置。

【請求項 2】 前記ファイバ群を構成する前記複数の光ファイバは、それぞれの少なくとも出力端部が束ねられてバンドルファイバが構成されていることを特徴とする請求項 1 に記載の光源装置。

【請求項 3】 前記各光ファイバを含んで構成される各光経路の一部には、光増幅を行うことができるファイバ増幅器が少なくとも 1 段設けられ、

前記光量制御装置は、前記各光ファイバからの前記光出力のオン・オフを前記ファイバ増幅器の励起用光源からの励起光の強度の切り換えにより行うことを特徴とする請求項 1 又は 2 に記載の光源装置。

【請求項 4】 前記光量制御装置は、前記励起用光源からの励起光の強度を所定レベルと零レベルとのいずれかに択一的に設定することにより前記励起光の強度の切り換えを行うことを特徴とする請求項 3 に記載の光源装置。

【請求項 5】 前記光量制御装置は、前記励起用光源をオン・オフすることにより、前記励起光の強度を所定レベルと零レベルとのいずれかに択一的に設定することを特徴とする請求項 4 に記載の光源装置。

【請求項 6】 前記光量制御装置は、前記励起用光源からの励起光の強度を所定の第 1 レベルと該第 1 レベルより小さい第 2 レベルとのいずれかに択一的に設定することにより前記励起光の強度の切り換えを行うことを特徴とする請求項 3 に記載の光源装置。

【請求項 7】 前記各光経路には、前記ファイバ増幅器が複数段設けられ、

前記光量制御装置は、前記各光ファイバからの前記光出力のオン・オフを最終段のファイバ増幅器の励起用光源からの励起光の強度の切り換えにより行うことを特徴とする請求項 3 ～ 6 のいずれか一項に記載の光源装置。

【請求項 8】 前記最終段の前記ファイバ増幅器は、他の段のファイバ増幅器に比べてモードフィールド径が大きいことを特徴とする請求項 7 に記載の光源装置。

【請求項 9】 前記各光ファイバからの光出力のオン・オフ状況に対応する出力強度マップが予め記憶された記憶装置を更に備え、

前記光量制御装置は、前記出力強度マップと所定の設定光量とに基づいて前記各光ファイバからの光出力を個別にオン・オフすることを特徴とする請求項 1 ～ 8 のいずれか一項に記載の光源装置。

【請求項 10】 前記出力強度マップは、予め測定された各ファイバ出力のばらつきに基づいて作成されていることを特徴とする請求項 9 に記載の光源装置。

【請求項 11】 前記各光ファイバから出力される前記光の波長を変換する波長変換部を更に備えることを特徴とする請求項 1 ～ 8 のいずれか一項に記載の光源装置。

【請求項 12】 前記各光ファイバから出力される前記光の波長を変換する波長変換部を更に備え、

前記出力強度マップは、予め測定された前記各ファイバ出力に対応する波長変換効率のばらつきに起因する出力のばらつきを更に考慮して作成されていることを特徴とする請求項 9 又は 10 に記載の光源装置。

【請求項 13】 前記光発生部は、単一波長の光を発生する光源と、前記光源からの光を所定周波数のパルス光に変換して出力する光変調器とを有し、

前記光量制御装置は、前記光変調器から出力されるパルス光の周波数及びピークパワーの少なくとも一方を更に制御することを特徴とする請求項 1 ～ 12 のいずれか一項に記載の光源装置。

【請求項 14】 前記複数の光ファイバそれぞれからの光出力を個別に遅延させて、前記光出力を時間的にずらして行わせる遅延部を更に備えることを特徴

とする請求項 1 ～ 1 3 のいずれか一項に記載の光源装置。

【請求項 1 5】 単一波長の光を発生する光源装置であって、

単一波長の光を発生する光源と、該光源からの光を所定周波数のパルス光に変換して出力する光変調器とを有する光発生部と；

前記光発生部によって発生されたパルス光を増幅する少なくとも 1 段のファイバ増幅器を含む光増幅部と；

---

前記光変調器から出力される前記パルス光の周波数を制御することにより前記ファイバ増幅器からの出力光の光量を制御する光量制御装置とを備える光源装置。

【請求項 1 6】 前記光増幅部に入力するパルス光の周波数に応じた前記光増幅部の出力強度マップが記憶された記憶装置を更に備え、

前記光量制御装置は、前記出力強度マップと所定の設定光量とに基づいて前記光変調器から出力される前記パルス光の周波数を制御することを特徴とする請求項 1 5 に記載の光源装置。

【請求項 1 7】 前記光量制御装置は、前記光変調器から出力される前記パルス光のピークパワーを更に制御することを特徴とする請求項 1 5 又は 1 6 に記載の光源装置。

【請求項 1 8】 前記光変調器は、電気光学変調器であり、

前記光量制御装置は、前記光変調器に印加する電圧パルスの周波数を制御することにより、前記パルス光の周波数を制御することを特徴とする請求項 1 5 又は 1 6 に記載の光源装置。

【請求項 1 9】 単一波長の光を発生する光源装置であって、

単一波長の光を発生する光源と、該光源からの光を所定周波数のパルス光に変換して出力する光変調器とを有する光発生部と；

前記光発生部によって発生されたパルス光を増幅する少なくとも 1 段のファイバ増幅器を含む光増幅部と；

前記光変調装置から出力される前記パルス光のピークパワーを制御することにより前記光増幅部からの出力光の光量を制御する光量制御装置とを備える光源装置。

【請求項 2 0】 前記光増幅部に入力するパルス光の強度に応じた前記光増幅部の出力強度マップが記憶された記憶装置を更に備え、

前記光量制御装置は、前記出力強度マップと所定の設定光量とに基づいて前記光変調器から出力される前記パルス光のピークパワーを制御することを特徴とする請求項 1 9 に記載の光源装置。

【請求項 2 1】 前記光変調器は、電気光学変調器であり、

前記光量制御装置は、前記光変調器に印加する電圧パルスのピークレベルを制御することにより、前記パルス光のピークパワーを制御することを特徴とする請求項 1 9 又は 2 0 に記載の光源装置。

【請求項 2 2】 前記光増幅部は複数並列に設けられ、

前記各光増幅部の光出力端部は光ファイバによりそれぞれ構成されていることを特徴とする請求項 1 5 ～ 2 1 のいずれか一項に記載の光源装置。

【請求項 2 3】 前記複数の光増幅部をそれぞれ構成する前記複数の光ファイバは、束ねられてバンドルファイバが構成されていることを特徴とする請求項 2 2 に記載の光源装置。

【請求項 2 4】 前記光増幅部から出力される光の波長を変換する波長変換部を更に備えることを特徴とする請求項 1 5 ～ 2 3 のいずれか一項に記載の光源装置。

【請求項 2 5】 前記複数の光増幅部のそれぞれからの光出力を個別に遅延させて、前記光出力を時間的にずらして行わせる遅延部を更に備えることを特徴とする請求項 2 2 又は 2 3 に記載の光源装置。

【請求項 2 6】 前記光発生部は、赤外域から可視域までの範囲内の単一波長のレーザ光を発生し、

前記波長変換部は、前記レーザ光の高調波である紫外光を出力することを特徴とする請求項 1 1、1 2、2 4 のいずれか一項に記載の光源装置。

【請求項 2 7】 前記光発生部は、波長 1. 5  $\mu$ m 付近の単一波長のレーザ光を発生し、

前記波長変換部は、前記波長 1. 5  $\mu$ m 付近の前記レーザ光の 8 倍高調波又は 1 0 倍高調波を発生することを特徴とする請求項 2 6 に記載の光源装置。

【請求項 28】 マスクに形成されたパターンを基板上に転写する露光装置であって、

請求項 26 又は 27 に記載の光源装置と；

前記光源装置から出力される光を露光用照明光として前記マスクを照明する照明光学系とを備える露光装置。

【請求項 29】 前記照明光学系内には、前記マスクのパターン面上における照明光の分布を均一化するオプティカルインテグレータが設けられていることを特徴とする請求項 28 に記載の露光装置。

【請求項 30】 前記照明光学系は、ケーラー照明系であることを特徴とする請求項 28 又は 29 に記載の露光装置。

【請求項 31】 マスクに形成されたパターンを基板上に繰り返し転写する露光装置であって、

単一波長の光を発生する光源と、前記光源からの光をパルス光に変換する光変調器とを有する光発生部と；

前記光発生部によって発生されたパルス光を増幅する少なくとも 1 段のファイバ増幅器を含む光増幅部と；

前記増幅されたパルス光を前記マスクに照射して、該マスクを介して前記基板を露光する際に、その露光対象領域の基板上の位置に応じて前記光変調器を介して前記パルス光の周波数及びピークパワーの少なくとも一方を制御する制御装置とを備える露光装置。

【請求項 32】 マスクに形成されたパターンを基板上に転写する露光装置であって、

単一波長の光を発生する光源と、前記光源からの光をパルス光に変換する光変調器とを有する光発生部と；

前記パルス光を増幅する光ファイバ増幅器を少なくとも各 1 段含み、前記光発生部の出力段に並列に配置された複数の光経路から成る光増幅部と；

前記光増幅部からの前記パルス光を前記マスクに照射して、該マスクを介して前記基板を露光する際に、前記各光経路からの光出力を個別にオン・オフすることにより前記光増幅部から出力されるパルス光の光量を制御する制御装置とを備

える露光装置。

【請求項 3 3】 前記光源は、赤外域又は可視域のレーザ光を発生し、  
前記光増幅部で増幅された前記パルス光を紫外光に波長変換する波長変換部を更に備えることを特徴とする請求項 3 1 又は 3 2 に記載の露光装置。

【請求項 3 4】 マスクに形成されたパターンを基板上に繰り返し転写する露光方法であって、

パルス光をファイバ増幅器を用いて少なくとも 1 回増幅する第 1 工程と；

前記増幅されたパルス光を前記マスクに照射し、該マスクを介して前記基板上の露光対象領域を露光する第 2 工程と；

前記第 1 工程の処理に先立って、光源からのレーザ光を前記パルス光に変換するとともに、前記露光対象領域の基板上的位置に応じて前記パルス光の周波数及びピークパワーの少なくとも一方を制御する第 3 工程とを含む露光方法。

【請求項 3 5】 前記ファイバ増幅器は、複数並列に設けられ、

前記第 1 工程では、選択されたファイバ増幅器のみを用いて前記パルス光の増幅を行うことを特徴とする請求項 3 4 に記載の露光方法。

【請求項 3 6】 前記光源は、赤外域又は可視域のレーザ光を発生し、

前記パルス光が前記マスクに照射される前に前記増幅されたパルス光を紫外光に波長変換する第 4 工程を更に含むことを特徴とする請求項 3 4 又は 3 5 に記載の露光方法。

【請求項 3 7】 フォトリソグラフィ工程を含むデバイス製造方法であって

、

前記フォトリソグラフィ工程で、請求項 2 8 ～ 3 3 のいずれか一項に記載の露光装置を用いて露光を行うことを特徴とするデバイス製造方法。

【請求項 3 8】 フォトリソグラフィ工程を含むデバイス製造方法であって

、

前記フォトリソグラフィ工程で、請求項 3 4 ～ 3 6 のいずれか一項に記載の露光方法を用いることを特徴とするデバイス製造方法。

【請求項 3 9】 請求項 3 7 又は 3 8 に記載のデバイス製造方法により製造されたデバイス。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、光源装置、露光装置及び露光方法、並びにデバイス及びその製造方法に係り、更に詳しくは、半導体素子、液晶表示素子等を製造する際にリソグラフィ工程で用いられる露光装置の露光用光源として好適な光源装置、該光源装置を露光用光源として備えた露光装置、該露光装置による露光方法、並びに前記露光装置及び露光方法を用いてデバイスを製造する方法及び該デバイス製造方法によって製造されるデバイスに関する。

【0002】

【従来の技術】

従来より、半導体素子（集積回路）、液晶表示素子等を製造するためのリソグラフィ工程では、種々の露光装置が用いられている。近年では、この種の露光装置としては、フォトマスク又はレチクル上に形成された微細回路パターンを、表面にフォトレジストが塗布されたウエハ又はガラスプレート等の基板上に投影光学系を介して縮小投影し、転写する、いわゆるステッパあるいはいわゆるスキヤニング・ステッパ等の縮小投影露光装置が、高いスループットを有する点から主流となっている。

【0003】

しかるに、投影露光装置等の露光装置では、高スループットとともに高い解像力（解像度）が要請される。投影露光装置の解像力 $R$ 、焦点深度 $DOF$ は、露光用照明光の波長 $\lambda$ 、投影光学系の開口数 $N.A.$ を用いて、次式（1）、（2）によってそれぞれ表される。

【0004】

$$R = K \cdot \lambda / N.A. \quad \dots\dots (1)$$

【0005】

$$DF = \lambda / 2 (N.A.)^2 \quad \dots\dots (2)$$

【0006】

上記の式（1）から明らかなように、解像力 $R$ 、すなわち解像できる最小パタ

ーン線幅をより小さくするために、①比例定数 $K$ を小さくする、② $N.A.$ を大きくする、③露光用照明光の波長 $\lambda$ を小さくする、の3つの方法が考えられる。ここで、比例定数 $K$ は投影光学系やプロセスによって決まる定数であり、通常0.5~0.8程度の値をとる。この定数 $K$ を小さくする方法は、広い意味での超解像と呼ばれている。今までに、投影光学系の改良、変形照明、位相シフトレチクルなどが提案、研究されてきた。しかし、適用できるパターンに制限があるなどの難点があった。

## 【0007】

一方、開口数 $N.A.$ は式(1)からその値が大きいほど解像力 $R$ を小さくできるが、このことは同時に式(2)から明らかなように焦点深度 $DOF$ が浅くなってしまうことを意味する。このため、 $N.A.$ 値は大きくするにも限界があり、通常は0.5~0.6程度が適当とされている。

## 【0008】

従って、解像力 $R$ を小さくする最も単純かつ有効な方法は、露光用照明光の波長 $\lambda$ を小さくすることである。

## 【0009】

かかる理由により、ステッパ等としては紫外域の輝線( $g$ 線、 $i$ 線等)を出力する超高圧水銀ランプを露光用光源とする $g$ 線ステッパ、 $i$ 線ステッパが従来主として用いられていたが、近年ではより短波長の $KrF$ エキシマレーザ光(波長248nm)を出力する $KrF$ エキシマレーザを光源とする $KrF$ エキシマレーザ・ステッパが主流となりつつある。現在ではさらに短波長の光源として $ArF$ エキシマレーザ(波長193nm)を使用する露光装置の開発が進められている。

## 【0010】

## 【発明が解決しようとする課題】

しかしながら、上述したエキシマレーザは大型であること、1パルスあたりのエネルギーが大きいことにより光学部品の損傷が生じやすいこと、有毒なフッ素ガスを使用するためレーザのメンテナンスが煩雑でかつ費用が高額となるなどの、露光装置の光源として不利な点が存在する。



## 【0011】

また、露光装置にはウエハ毎のレジスト感度等の違いにあわせた露光量制御性能を実現することが求められ、広いダイナミックレンジ、典型的には $1 \sim 1/7$ 程度が求められる。従来のエキシマレーザを光源とする露光装置では、上記のウエハ毎のレジスト感度等の違いにあわせた露光量制御のために、例えばNDフィルタ等のエネルギー粗調器が用いられている。

## 【0012】

しかしながら、かかる手法による場合には、透過率が較正されたNDフィルタが必要であり、NDフィルタの耐久性、透過率の経時変化も問題になる。さらに、最大光量の $1/7$ の露光量しか必要としない場合でも、エキシマレーザは最大出力強度で動作し、出力光の $6/7$ は露光には使用されず無駄になる。また、光学部品消耗、消費電力の点でも問題があった。

## 【0013】

現状の露光装置には、上記のウエハ毎のレジスト感度等の違いにあわせた光量制御性能（以下、適宜「第1の露光量制御性能」と呼ぶ）の他、同一ウエハ内におけるショット領域（チップ）毎のプロセスばらつきを補正する露光量制御性能（以下、適宜「第2の露光量制御性能」と呼ぶ）が要求される。また、スキヤニング・ステッパの場合には、ショット領域内の線幅均一性を実現するための露光量制御性能（以下、適宜「第3の露光量制御性能」と呼ぶ）が更に要求される。

## 【0014】

現状の露光装置では、上記の第2の露光量制御性能として、ダイナミックレンジが設定露光量の $\pm 10\%$ 程度、ショット間ステッピング時間である $100\text{ms}$ 程度の時間内に設定値に制御すること、制御精度として設定露光量の $\pm 1\%$ 程度が要求されている。

## 【0015】

また、上記第3の露光量制御性能としては、制御精度として典型的には1ショットの露光時間である $20\text{ms}$ の時間内に設定露光量の $\pm 0.2\%$ に設定すること、制御速度 $1\text{ms}$ 程度が要求されている。

## 【0016】

従って、露光装置の光源として、上記第1～第3の露光量制御性能を実現するためにも、制御に必要な要請に応じた制御を行うことができる光源装置の出現が期待されている。ここで、制御に必要な要請とは、(a) 制御のダイナミックレンジ、(b) 制御精度、(c) 制御速度、(d) 検出光強度と制御量とのリニアリティの程度、(e) 省電力を目的とするエネルギーセーブの機能等である。

【0017】

本発明は、かかる事情の下になされたもので、その第1の目的は、上記の制御に必要な要請に応じた光量制御を行うことができる光源装置を提供することにある。

【0018】

本発明の第2の目的は、要求される露光量制御を容易に実現することができる露光装置及び露光方法を提供することにある。

【0019】

本発明の第3の目的は、高集積度のマイクロデバイスの生産性を向上することができるデバイス製造方法を提供することにある。

【0020】

【課題を解決するための手段】

請求項1に記載の発明は、単一波長の光を発生する光源装置であって、単一波長の光を発生する光発生部(160)と；前記光発生部の出力段に並列に配置された複数の光ファイバから成るファイバ群と；前記各光ファイバからの光出力を個別にオン・オフすることにより前記ファイバ群から出力される光の光量を制御する光量制御装置(16C)とを備える。

【0021】

これによれば、光発生部で発生した単一波長の光が、その出力段に並列に配置されたファイバ群を構成する複数の光ファイバのそれぞれに向かって進むが、光量制御装置では各光ファイバからの光出力を個別にオン・オフすることによりファイバ群から出力される光の光量を制御する。このように本発明では、ファイバ群を構成する各光ファイバの光出力を個別にオン・オフするという簡単な手法によりファイバ群から出力される光の光量制御を実現することができるとともに、

光ファイバの数に比例した複数段階の光量制御が可能となるので、広いダイナミックレンジを容易に実現することができる。この場合、各光ファイバの諸性能（ファイバ径等を含む）は異なっても良いが、各光ファイバの諸性能がほぼ同じである場合には、光ファイバのそれぞれからの同一光量の光を出力させることができる結果、光ファイバの数 $N$ に応じた $N$ 段階の光量制御を正確かつ確実に実行することができる。従って、例えば、 $N \geq 100$ とすれば、1%刻み以下の精度で光量を制御することができる。この場合、制御量と光量とのリニアリティの程度も良い。勿論、この場合、NDフィルタ等のエネルギー粗調器は不要となるので、該フィルタの耐久性、透過率の経時変化等に起因する光量制御性能の劣化等の諸問題も改善できる。

## 【0022】

この場合において、請求項2に記載の発明の如く、前記ファイバ群を構成する前記複数の光ファイバは、それぞれの少なくとも出力端部が束ねられてバンドルファイバ（173）が構成されていても良い。通常、光ファイバの径は細いので、100本以上束ねても直径が数mm程度以内に収めることができ、そのバンドルファイバの出力段に何らかの光学素子を配置する場合に、小型の光学素子を配置できる。

## 【0023】

上記請求項1及び2に記載の各発明に係る光源装置では、各光ファイバからの光出力をオン・オフする手法は、例えば、各光ファイバに対する入射光を遮光する機械的又は電気的なシャッタ、あるいは各光ファイバからの光の出射を阻止する機械的又は電気的なシャッタを設ける等種々考えられるが、例えば、請求項3に記載の発明の如く、前記各光ファイバを含んで構成される各光経路（172<sub>n</sub>）の一部に、光増幅を行うことができるファイバ増幅器（168<sub>n</sub>、171<sub>n</sub>）が少なくとも1段設けられている場合には、前記光量制御装置は、前記各光ファイバからの前記光出力のオン・オフを前記ファイバ増幅器の励起用光源（174、178）からの励起光の強度の切り換えにより行うこととしても良い。

## 【0024】

ここで、「各光ファイバを含んで構成される各光経路の一部に、光増幅を行う

ことができるファイバ増幅器が少なくとも1段設けられている」とは、各光経路が光ファイバとは別にその入力段に設けられた光増幅器を有している場合、各光経路を構成する光ファイバの一部がファイバ増幅器となっている場合」のいずれをも含む。

## 【0025】

かかる場合には、ファイバ増幅器により各光ファイバを含む光経路に入射した光を増幅できるとともに、光出力をオフすることとされた光ファイバを含む光経路に設けられた光増幅器に対する励起光の強度レベルが低く（零を含む）設定されるので、その分省エネが可能である。また、ファイバ増幅器の励起用光源からの励起光の強度の切り換えにより光出力のオン・オフを行うので、シャッタ等を用いる場合に比べて短時間で光出力のオン・オフが可能である。

## 【0026】

この場合において、励起光の強度レベルの切り換えは、所定範囲内の固定的でない2つのレベル間で行っても良いが、請求項4に記載の発明の如く、前記光量制御装置は、前記励起用光源からの励起光の強度を所定レベルと零レベルとのいずれかに択一的に設定することにより前記励起光の強度の切り換えを行うこととしても良い。かかる場合、請求項5に記載の発明の如く、前記光量制御装置は、前記励起用光源をオン・オフすることにより、前記励起光の強度を所定レベルと零レベルとのいずれかに択一的に設定することとしても良い。

## 【0027】

上記請求項3に記載の発明に係る光源装置において、請求項6に記載の発明の如く、前記光量制御装置は、前記励起用光源からの励起光の強度を所定の第1レベルと該第1レベルより小さい第2レベルとのいずれかに択一的に設定することにより前記励起光の強度の切り換えを行うこととしても良い。すなわち、ファイバ増幅器では、励起光の強度を零にしなくても所定量以下にすると、光の吸収が生じて、ファイバ増幅器からの出射光強度は殆ど零となるので、励起用光源からの励起光の強度を所定の第1レベルと該第1レベルより小さい第2レベルとのいずれかに択一的に設定することにより、光ファイバからの光出力をオン・オフすることができる。この場合も第1レベル、第2レベルは所定範囲内の固定的でな

い 2 つのレベルであっても良い。

【 0 0 2 8 】

上記請求項 3 ～ 6 に記載の各発明に係る光源装置において、請求項 7 に記載の発明の如く、前記各光経路に、前記ファイバ増幅器が複数段設けられている場合、前記光量制御装置は、前記各光ファイバからの前記光出力のオン・オフを最終段のファイバ増幅器（1 7 1<sub>n</sub>）の励起用光源からの励起光の強度の切り換えにより行うこととしても良い。かかる場合には、最終段以外のファイバ増幅器の励起用光源からの励起光の強度を切り換える場合に問題となる A S E（Amplified Spontaneous Emission, 自然放出光）の悪影響を回避することができるとともに、後段のファイバ程大きな励起光の強度を必要とするので光ファイバからの光出力をオフしたときの励起用光源の省エネの効果が一層大きくなる。

【 0 0 2 9 】

この場合において、請求項 8 に記載の発明の如く、前記最終段の前記ファイバ増幅器は、他の段のファイバ増幅器に比べてモードフィールド径が大きいことが望ましい。かかる場合には、光ファイバ中での非線形効果による増幅光のスペクトル幅の増加を避けることができる。

【 0 0 3 0 】

上記請求項 1 ～ 8 に記載の各発明に係る光源装置において、前記各光ファイバからの光出力のオン・オフ状況に対応する出力強度マップが予め記憶された記憶装置（5 1）を更に備え、前記光量制御装置は、前記出力強度マップと所定の設定光量に基づいて前記各光ファイバからの光出力を個別にオン・オフすることとしても良い。かかる場合には、各光ファイバの出力にばらつきがあってもファイバ群の光出力を設定光量にほぼ一致させることができるとともに、諸性能の異なる光ファイバを用いることも可能となる。

【 0 0 3 1 】

この場合において、前記出力強度マップは、予め測定された各ファイバ出力のばらつきに基づいて作成されていることが望ましい。かかる場合には予め実際に測定された各ファイバ出力のばらつきに基づいて出力強度マップが作成されているので、ファイバ群の光出力を設定光量に確実に一致させることができる。

## 【0032】

上記請求項1～8に記載の各発明に係る光源装置において、請求項11に記載の発明の如く、前記各光ファイバから出力される前記光の波長を変換する波長変換部（163）を更に備えていても良い。かかる場合には、波長変換部出力は、光出力がオンであるファイバ数に比例する。このため、例えば、各光ファイバの諸性能がほぼ同じである場合には、光ファイバのそれぞれから同一光量の光を出力させることができる結果、ニアリティ良く光量を制御することができる。

## 【0033】

請求項9及び10に記載の各発明に係る光源装置において、請求項12に記載の発明の如く、前記各光ファイバから出力される前記光の波長を変換する波長変換部を更に備える場合には、前記出力強度マップは、予め測定された前記各ファイバ出力に対応する波長変換効率のばらつきに起因する出力のばらつきを更に考慮して作成されていることが望ましい。かかる場合には、各光ファイバからの光出力に対する波長変換効率にばらつきがあっても、出力光の光量を設定光量に制御することができる。

## 【0034】

上記請求項1～12に記載の各発明に係る光源装置において、請求項13に記載の発明の如く、前記光発生部が、単一波長の光を発生する光源（160A）と、前記光源からの光を所定周波数のパルス光に変換して出力する光変調器（160C）とを有する場合には、前記光量制御装置は、前記光変調器から出力されるパルス光の周波数及びピークパワーの少なくとも一方を更に制御することとしても良い。かかる場合には、光ファイバ群を構成する各ファイバの光出力の個別オン・オフによる段階的な光量制御に加えて、各段階間の光量の微調整が光変調器から出力されるパルス光の周波数及びピークパワーの少なくとも一方の制御により可能になるので、結果的に光量の連続制御が可能となり、所定範囲内であれば設定露光量が如何なる値に設定されても、出力光の光量をその設定光量に一致させることが可能になる。

## 【0035】

上記請求項1～13に記載の各発明に係る光源装置において、請求項14に記

載の発明の如く、前記複数の光ファイバそれぞれからの光出力を個別に遅延させて、前記光出力を時間的にずらして行わせる遅延部（167）を更に備えていても良い。かかる場合には、各光ファイバから出力される光が時間的に重なることがなくなるので、結果的に空間的コヒーレンシーを低減することが可能になる。

## 【0036】

請求項15に記載の発明は、単一波長の光を発生する光源装置であって、単一波長の光を発生する光源（160A）と、該光源からの光を所定周波数のパルス光に変換して出力する光変調器（160C）とを有する光発生部（160）と；前記光発生部によって発生されたパルス光を増幅する少なくとも1段のファイバ増幅器を含む光増幅部（161）と；前記光変調器から出力される前記パルス光の周波数を制御することにより前記ファイバ増幅器からの出力光の光量を制御する光量制御装置（16C）とを備える。

## 【0037】

これによれば、光発生部内では、光源から単一波長の光が発生され、その光が光変調器によって所定周波数のパルス光に変換され出力される。そして、このパルス光は、光増幅部によって増幅されピークパワーのより大きなパルス光として出力される。しかるに、パルス光の単位時間当たりの光量（積算光量）は、パルス光のピークパワーがほぼ一定であれば、その周波数に応じて増減するので、光量制御装置が光変調器から出力されるパルス光の周波数を制御することにより、ファイバ増幅器からの出力光の光量を設定光量（目標光量）に一致させることができる。本発明によるパルス光の周波数（単位時間当たりのパルス数）制御による光量調整では、前述した請求項1に記載の発明に比べて、より高速にかつより細やかな光量調整を行うことが可能となり、設定光量が所定範囲内であれば如何なる値に設定されても光量をほぼ一致させることができる。また、光出力と制御量とのリニアリティも請求項1に記載の発明と同等以上になる。

## 【0038】

この場合において、請求項16に記載の発明の如く、前記光増幅部に入力するパルス光の周波数に応じた前記光増幅部の出力強度マップが記憶された記憶装置（51）を更に備える場合には、前記光量制御装置は、前記出力強度マップと所

定の設定光量とに基づいて前記光変調器から出力される前記パルス光の周波数を制御することとしても良い。光変調器からのパルス光の周波数に応じて光増幅器の入力光の強度が変化し、光増幅部を構成するファイバ増幅器の利得は入力光強度依存性を有するが、本発明によれば、前記入力光強度依存性に起因する光増幅部からの出力パルスのピークパワー変化の影響を受けることのない、高精度な光量制御が可能となる。

---

## 【0039】

上記請求項15及び16に記載の各発明において、請求項17に記載の発明の如く、前記光量制御装置は、前記光変調器から出力される前記パルス光のピークパワーを更に制御することとしても良い。かかる場合には、パルス光のピークパワーに変動があるような場合であっても、精度の良い光量制御が可能となる。

## 【0040】

上記請求項15及び16に記載の各発明において、請求項18に記載の発明の如く、前記光変調器が、電気光学変調器である場合に、前記光量制御装置は、前記光変調器に印加する電圧パルスの周波数を制御することにより、前記パルス光の周波数を制御することとしても良い。電気光学変調器の出力パルス光の周波数は、その光変調器に印加する電圧パルスの周波数に一致する。

## 【0041】

請求項19に記載の発明は、単一波長の光を発生する光源装置であって、単一波長の光を発生する光源(160A)と、該光源からの光を所定周波数のパルス光に変換して出力する光変調器(160C)とを有する光発生部(160)と；前記光発生部によって発生されたパルス光を増幅する少なくとも1段のファイバ増幅器を含む光増幅部(161)と；前記光変調装置から出力される前記パルス光のピークパワーを制御することにより前記光増幅部からの出力光の光量を制御する光量制御装置(16C)とを備える。

## 【0042】

これによれば、光発生部内では、光源から単一波長の光が発生され、その光が光変調器によって所定周波数のパルス光に変換され出力される。そして、このパルス光は、光増幅部によって増幅されピークパワーのより大きなパルス光として



出力される。光増幅部から出力されるパルス光の単位時間当たりの光量（積算光量）は、当然に光変調器からのパルス光のピークパワーに応じて増減するので、光量制御装置が光変調器から出力されるパルス光のピークパワーを制御することにより、ファイバ増幅器からの出力光の光量を設定光量（目標光量）に一致させることができる。本発明によるパルス光のピークパワー制御による光量調整では、前述した請求項 1 に記載の発明に比べて、より高速にかつより細やかな光量調整を行うことが可能となり、設定光量が所定範囲内にあれば如何なる値に設定されても光量をほぼ一致させることができる。

【 0 0 4 3 】

この場合において、請求項 2 0 に記載の発明の如く、前記光増幅部に入力するパルス光の強度に応じた前記光増幅部の出力強度マップが記憶された記憶装置（5 1）を更に備える場合には、前記光量制御装置は、前記出力強度マップと所定の設定光量とに基づいて前記光変調器から出力される前記パルス光のピークパワーを制御することとしても良い。かかる場合には、光増幅部を構成するファイバ増幅器の利得の入力光強度依存性に起因する光増幅部からの出力パルスのピークパワー変化の影響を受けることの無い、高精度な光量制御が可能となる。

【 0 0 4 4 】

請求項 1 9 及び 2 0 に記載の各発明において、請求項 2 1 に記載の発明の如く、前記光変調器は、電気光学変調器であり、前記光量制御装置は、前記光変調器に印加する電圧パルスのピークレベルを制御することにより、前記パルス光のピークパワーを制御することとしても良い。電気光学変調器からの出力光のパルスピーク強度は電気光学変調器に印加される電圧パルスのパルスピーク強度に依存する。

【 0 0 4 5 】

請求項 1 5 ～ 2 1 に記載の各発明に係る光源装置において、請求項 2 2 に記載の発明の如く、前記光増幅部は複数並列に設けられ、前記各光増幅部の光出力端部は光ファイバによりそれぞれ構成されていても良い。

【 0 0 4 6 】

この場合において、請求項 2 3 に記載の発明の如く、前記複数の光増幅部をそ

れぞれ構成する前記複数の光ファイバは、束ねられてバンドルファイバ（173）が構成されていても良い。通常、光ファイバの径は細いので、100本以上束ねても直径が数mm程度以内に収めることができ、そのバンドルファイバの出力段に何らかの光学素子を配置する場合に、小型の光学素子を配置できる。

## 【0047】

上記請求項15～23に記載の各発明に係る光源装置において、請求項24に記載の発明の如く、前記光増幅部から出力される光の波長を変換する波長変換部（163）を更に備えていても良い。かかる場合には、波長変換部からの出力光の光量は、光増幅部出力、ひいては光変調器からのパルス光の入力強度（光量）に応じた値となる。但し、確実にパルス光の入力強度（光量）に比例した値となるわけではなく、光増幅部の出力パルスのピーク強度に対し、最高で波長変換部から出力される高調波の次数のべき乗に比例した非線形の依存性を示す。一方、前記光変調器が電気光学変調器である場合には、その出力光のパルスピーク強度の、電気光学変調器に印加される電圧パルスのパルスピーク強度依存性は、 $\cos(V)$ であるため、上記の波長変換部の非線形な依存性は緩和される。従って、波長変換部を備える場合には、前記光変調器は、電気光学変調器であることが望ましい。

## 【0048】

上記請求項22及び23に記載の各発明において、請求項25に記載の発明の如く、前記複数の光増幅部のそれぞれからの光出力を個別に遅延させて、前記光出力を時間的にずらして行わせる遅延部（167）を更に備えていても良い。かかる場合には、各光ファイバから出力される光が時間的に重なることがなくなるので、結果的に空間的コヒーレンシーを低減することが可能になる。

## 【0049】

上記請求項11、12、24に記載の各発明に係る光源装置において、請求項26に記載の発明の如く、前記光発生部は、赤外域から可視域までの範囲内の単一波長のレーザ光を発生し、前記波長変換部は、前記レーザ光の高調波である紫外光を出力することを特徴としても良い。

## 【0050】

この場合において、請求項 27 に記載の発明の如く、前記光発生部は、波長 1.5  $\mu$ m 付近の単一波長のレーザ光を発生し、前記波長変換部は、前記波長 1.5  $\mu$ m 付近の前記レーザ光の 8 倍高調波又は 10 倍高調波を発生することとしても良い。

【0051】

請求項 28 に記載の発明は、マスク (R) に形成されたパターンを基板 (W) 上に転写する露光装置であって、請求項 26 又は 27 に記載の光源装置 (16) と；前記光源装置から出力される光を露光用照明光として前記マスクを照明する照明光学系 (12) とを備える。

【0052】

これによれば、照明光学系により光源装置の波長変換部から出力される紫外光を露光用照明光としてマスクが照明され、該マスクに形成されたパターンが基板上に転写される。この場合、光源装置により、マスクに照射される紫外光の光量制御を必要な要請に応じて行うことができるので、結果的に要求される露光量制御を実現することができる。

【0053】

この場合において、請求項 29 に記載の発明の如く、前記照明光学系内には、前記マスクのパターン面上における照明光の分布を均一化するオプティカルインテグレータ (22) が設けられていても良い。特に、光ファイバが複数並列に設けられる場合には、オプティカルインテグレータによりマスク面上での照明光分布が各光ファイバからの光出力の変動（オン・オフを含む）によって変動するのを抑制することができるので、特に望ましい。

【0054】

請求項 28 及び 29 に記載の各発明に係る露光装置において、請求項 30 に記載の発明の如く、前記照明光学系は、ケーラー照明系であっても良い。

【0055】

請求項 31 に記載の発明は、マスクに形成されたパターンを基板上に繰り返し転写する露光装置であって、単一波長の光を発生する光源 (160A) と、前記光源からの光をパルス光に変換する光変調器 (160C) とを有する光発生部 (

1 6 0) と ; 前記光発生部によって発生されたパルス光を増幅する少なくとも 1 段のファイバ増幅器を含む光増幅部 (1 6 1) と ; 前記増幅されたパルス光を前記マスクに照射して、該マスクを介して前記基板を露光する際に、その露光対象領域の基板上の位置に応じて前記光変調器を介して前記パルス光の周波数及びピークパワーの少なくとも一方を制御する制御装置 (5 0) とを備える。

## 【0 0 5 6】

これによれば、光発生部では、光源で発生した単一波長の光を光変調器によりパルス光に変換することによりパルス光を発生し、そのパルス光がファイバ増幅器を含む光増幅部によって増幅される。そして、制御装置により、その増幅されたパルス光をマスクに照射して、該マスクを介して基板を露光する際に、その露光対象領域の基板上の位置に応じて光変調器を介してパルス光の周波数及びピークパワーの少なくとも一方が制御され、これによりマスクに照射される光量、ひいては基板の露光量が高精度に制御される。従って、本発明によれば、基板上の露光対象領域の位置によらず、常に適切な露光量制御が可能となり、精度良くマスクのパターンを基板上に転写することが可能になる。

## 【0 0 5 7】

ここで「露光対象領域」とは、基板上に露光すべきショット領域が複数ある場合のそれぞれのショット領域、及び各ショット領域内の異なる領域の双方を含む概念である。従って、本発明によれば、いわゆるステッパ (スキャニング・ステッパを含む) における基板上の各ショット領域毎のプロセスばらつきの補正や走査型露光装置における 1 ショット領域内の線幅均一性の向上が可能になる。

## 【0 0 5 8】

請求項 3 2 に記載の発明は、マスク (R) に形成されたパターンを基板 (W) 上に転写する露光装置であって、単一波長の光を発生する光源 (1 6 0 A) と、前記光源からの光をパルス光に変換する光変調器 (1 6 0 C) とを有する光発生部 (1 6 0) と ; 前記パルス光を増幅するファイバ増幅器を少なくとも各 1 段含み、前記光発生部の出力段に並列に配置された複数の光経路 ( $1 7 2_n$ ) から成る光増幅部 (1 6 1) と ; 前記光増幅部からの前記パルス光を前記マスクに照射して、該マスクを介して前記基板を露光する際に、前記各光経路からの光出力を

個別にオン・オフすることにより前記光増幅部から出力されるパルス光の光量を制御する制御装置(50)とを備える。

## 【0059】

これによれば、光発生部では、光源で発生した単一波長の光を光変調器によりパルス光に変換することによりパルス光を発生し、そのパルス光がファイバ増幅器を含む光増幅部によって増幅される。そして、制御装置により、その増幅されたパルス光をマスクに照射して、該マスクを介して基板を露光する際に、各光経路からの光出力を個別にオン・オフすることにより光増幅部から出力されるパルス光の光量が制御され、これによりマスクに照射される光量、ひいては基板の露光量が広い範囲に渡って段階的に制御される。従って、本発明によれば、複数枚の基板を繰り返し露光する露光装置における基板毎のレジスト感度等の違いに合わせた露光量制御が可能になる。従って、レジスト感度等に影響を受けることなく、基板上にマスクパターンを要求される精度で転写することが可能になる。

## 【0060】

この場合も、制御装置は、上記の如くその露光対象領域の基板上の位置に応じて光変調器を介してパルス光の周波数及びピークパワーの少なくとも一方を制御するようにしても良い。

## 【0061】

請求項31及び32に記載の各発明において、請求項33に記載の発明の如く、前記光源は、赤外域又は可視域のレーザ光を発生し、前記光増幅部で増幅された前記パルス光を紫外光に波長変換する波長変換部を更に備えていても良い。

## 【0062】

請求項34に記載の発明は、マスクに形成されたパターンを基板上に繰り返し転写する露光方法であって、パルス光をファイバ増幅器を用いて少なくとも1回増幅する第1工程と；前記増幅されたパルス光を前記マスクに照射し、該マスクを介して前記基板上の露光対象領域を露光する第2工程と；前記第1工程の処理に先立って、光源からのレーザ光を前記パルス光に変換するとともに、前記露光対象領域の基板上の位置に応じて前記パルス光の周波数及びピークパワーの少なくとも一方を制御する第3工程とを含む。

## 【0063】

これによれば、パルス光をファイバ増幅器を用いて少なくとも1回増幅し、その増幅されたパルス光をマスクに照射し、該マスクを介して基板上の露光対象領域を露光する。この場合、パルス光をファイバ増幅器を用いて増幅するのに先立って、光源からのレーザ光をパルス光に変換するとともに、露光対象領域の基板上の位置に応じてパルス光の周波数及びピークパワーの少なくとも一方を制御する。従って、パルス光をマスクに照射し、該マスクを介して基板上の露光対象領域を露光する際には、露光対象領域の基板上の位置に応じて露光量が調整された状態で露光が行われることになる。従って、本発明によれば、基板上の露光対象領域の位置によらず、常に適切な露光量制御が可能となり、精度良くマスクのパターンを基板上に転写することが可能になる。

## 【0064】

ここで「露光対象領域」とは、基板上に露光すべきショット領域が複数ある場合のそれぞれのショット領域、及び各ショット領域内の異なる領域の双方を含む概念である。従って、本発明によれば、いわゆるステッパ（スキヤニング・ステッパを含む）における基板上の各ショット領域毎のプロセスばらつきの補正や走査型露光装置における1ショット領域内の線幅均一性の向上が可能になる。

## 【0065】

この場合において、請求項35に記載の発明の如く、前記ファイバ増幅器が、複数並列に設けられている場合には、前記第1工程では、選択されたファイバ増幅器のみを用いて前記パルス光の増幅を行うこととしても良い。かかる場合には、露光量の制御を広いダイナミックレンジで段階的に行うことができるので、上記の露光対象領域の基板上の位置に応じてパルス光の周波数及びピークパワーの少なくとも一方を制御する露光量制御との併用により、より広い範囲に渡って露光量制御を高精度に行なうことが可能になる。上記のファイバ増幅器の選択を、基板上のレジスト感度等に応じて行うことにより、基板毎のレジスト感度の違いに合わせた露光量の制御が可能になる。

## 【0066】

上記請求項34及び35に記載の各発明において、請求項36に記載の発明の

如く、前記光源は、赤外域又は可視域のレーザ光を発生し、前記パルス光が前記マスクに照射される前に前記増幅されたパルス光を紫外光に波長変換する第4工程を更に含んでいても良い。

## 【0067】

請求項37に記載の発明は、フォトリソグラフィ工程を含むデバイス製造方法であって、前記フォトリソグラフィ工程で、請求項28～33のいずれか一項に記載の露光装置を用いて露光を行うことを特徴とする。また、請求項38に記載の発明は、フォトリソグラフィ工程を含むデバイス製造方法であって、前記フォトリソグラフィ工程で、請求項34～36のいずれか一項に記載の露光方法を用いることを特徴とする。

## 【0068】

これらのデバイス製造方法によれば、上記請求項28～33に記載の各露光装置、請求項34～36に記載の各露光方法により精度良くマスクのパターンを基板上に転写することが可能になる結果、高集積度のマイクロデバイスの生産性を向上することができる。

## 【0069】

## 【発明の実施の形態】

以下、本発明の一実施形態を図1～図6に基づいて説明する。

## 【0070】

図1には、本発明に係る光源装置を含んで構成された一実施形態に係る露光装置10の概略構成が示されている。この露光装置10は、ステップ・アンド・スキャン方式の走査型露光装置である。

## 【0071】

この露光装置10は、光源装置16及び照明光学系12から成る照明系、この照明系からの露光用照明光（以下、「露光光」という）ILにより照明されるマスクとしてのレチクルRを保持するレチクルステージRST、レチクルRから射出された露光光ILを基板としてのウエハW上に投射する投影光学系PL、ウエハWを保持する基板ステージとしてのZチルトステージ58が搭載されたXYステージ14、及びこれらの制御系等を備えている。

## 【0072】

前記光源装置16は、例えば、波長193nm (ArFエキシマレーザ光とほぼ同一波長) の紫外パルス光、あるいは波長157nm (F<sub>2</sub>レーザ光とほぼ同一波長) の紫外パルス光を出力する高調波発生装置である。この光源装置16は、光源としてのレーザ光源を含む光源部16A、レーザ制御装置16B及び光量制御装置16Cとを備えている。この光源装置16は、前記照明光学系12、レチクルステージRST、投影光学系PL、Zチルトステージ58、XYステージ14及びこれら各部が搭載された不図示の本体コラム等から成る露光装置本体とともに、温度、圧力、湿度等が高精度に調整されたエンバイロメント・チャンバ(以下、「チャンバ」という)11内に収納されている。

## 【0073】

図2には、光源装置16の内部構成が装置全体を統括制御する主制御装置50とともにブロック図にて示されている。

## 【0074】

この図2に示されるように、光源部16Aは、光発生部としてのパルス光発生部160、光増幅部161、四分の一波長板162、波長変換部163、ビームモニタ機構164及び吸収セル165等を含んで構成されている。

## 【0075】

前記パルス光発生部160は、レーザ光源160A、光カップラBS1, BS2、光アイソレータ160B及び光変調器としての電気光学変調器(以下、「EOM」という)160C等を有する。なお、レーザ光源160Aと波長変換部163との間の各要素間は光ファイバにより光学的に接続されている。

## 【0076】

前記レーザ光源160Aとしては、ここでは、単一波長発振レーザ、例えば、発振波長1.544 $\mu$ m、連続波出力(以下「CW出力」という)20mWのInGaAsP, DFB半導体レーザが用いられている。以下においては、レーザ光源160Aを適宜「DFB半導体レーザ160A」とも呼ぶものとする。

## 【0077】

ここで、DFB半導体レーザとは、縦モード選択性の低いファブリーペロー型



共振器の代わりに、回折格子を半導体レーザ内に作り上げたもので、どのような状況下であっても単一縦モード発振をするように構成されており、分布帰還型(Distributed Feedback: DFB)レーザと呼ばれるものである。この様なレーザでは基本的に単一縦モード発振をすることから、その発振スペクトル線幅は0.01 pm以下に抑えられる。

## 【0078】

また、DFB半導体レーザは、通常、ヒートシンクの上に設けられ、これらが筐体内に収納されている。本実施形態では、DFB半導体レーザ160Aに付設されるヒートシンク上に温度調整器（例えばペルチェ素子など）が設けられており、後述するように、レーザ制御装置16Bがその温度を制御することにより発振波長が制御（調整）可能な構成となっている。

## 【0079】

すなわち、DFB半導体レーザの発振波長は0.1 nm/℃程度の温度依存性を持つ。従って、例えば、DFB半導体レーザの温度を1℃変化させると、基本波（1544 nm）ではその波長が0.1 nm変化するので、8倍波（193 nm）ではその波長が0.0125 nm変化し、10倍波（157 nm）ではその波長が0.01 nm変化することになる。

## 【0080】

なお、露光装置では露光用照明光（パルス光）の波長をその中心波長に対して±20 pm程度変化させることができれば十分である。従って、DFB半導体レーザ11の温度を8倍波では±1.6℃程度、10倍波では±2℃程度変化させれば良い。

## 【0081】

なお、レーザ光源160Aとして、DFB半導体レーザ等の半導体レーザに限らず、例えば発振波長が990 nm付近のイットリビウム(Yb)・ドープ・ファイバーレーザなどを用いることもできる。

## 【0082】

前記光カップラBS1、BS2としては、透過率が97%程度のものが用いられている。このため、DFB半導体レーザ160Aからのレーザ光は光カップラ

BS1で分波され、その97%程度が光カップラBS2に入射し、残り3%程度がビームモニタ機構164に入射する。また、光カップラBS2に入射したレーザ光は、該光カップラBS2で分波され、その97%程度が次段の光アイソレータ160Bに向かって進み、残り3%程度が吸収セル165に入射するようになっている。

## 【0083】

なお、ビームモニタ機構164、吸収セル165等については、後に更に詳述する。

## 【0084】

前記光アイソレータ160Bは、光カップラBS2からEOM160Cに向かう方向の光のみを通過させ、反対向きの光の通過を阻止するためのデバイスである。この光アイソレータ160Bにより、反射光（戻り光）に起因するDFB半導体レーザ160Aの発振モードの変化や雑音の発生等が防止される。

## 【0085】

前記EOM160Cは、光アイソレータ160Bを通過したレーザ光（CW光（連続光））をパルス光に変換するためのものである。EOM160Cとしては、屈折率の時間変化に伴うチャープによる半導体レーザ出力の波長広がり小さくなるように、チャープ補正を行った電極構造を持つ電気光学変調器（例えば二電極型変調器）が用いられている。EOM160Cは、光量制御装置16Cから印加される電圧パルスに同期して変調されたパルス光を出力する。一例として、EOM160CによりDFB半導体レーザ160Aで発振されたレーザ光がパルス幅1ns、繰り返し周波数100kHz（パルス周期約10μs）のパルス光に変調されるものとする、この光変調の結果、EOM160Cから出力されるパルス光のピーク出力は20mW、平均出力は2μWとなる。なお、ここでは、EOM160Cの挿入による損失がないものとしたが、その挿入損失がある、例えば損失が-3dBである場合、パルス光のピーク出力は10mW、平均出力は1μWとなる。

## 【0086】

なお、繰り返し周波数を100kHz程度以上に設定した場合には、後述する

ファイバ増幅器においてASE (Amplified Spontaneous Emission, 自然放出光) ノイズの影響による増幅率低下を阻止することができるので、このようにすることが望ましい。

## 【0087】

なお、EOM160Cのみを用いてパルス光をオフの状態にしてもその消光比が充分でない場合には、DFB半導体レーザ160Aの電流制御を併用することが望ましい。すなわち、半導体レーザなどではその電流制御を行うことで、出力光をパルス発振させることができるので、DFB半導体レーザ160Aの電流制御とEOM160Cとを併用してパルス光を発生させることが望ましい。一例として、DFB半導体レーザ160Aの電流制御によって、例えば10～20ns程度のパルス幅を有するパルス光を発振させるとともに、EOM160Cによってそのパルス光からその一部のみを切り出し、パルス幅が1nsのパルス光に変調する。このようにすれば、EOM160Cのみを用いる場合に比べて、パルス幅が狭いパルス光を容易に発生させることが可能になるとともに、パルス光の発振間隔や発振の開始及びその停止などをより簡単に制御することが可能になる。

## 【0088】

なお、EOM160Cに代えて、音響光学光変調素子(AOM)を用いることも可能である。

## 【0089】

前記光増幅部161は、EOM160Cからのパルス光を増幅するもので、ここでは、複数のファイバ増幅器を含んで構成されている。図3には、この光増幅部161の構成の一例が、EOM160Cとともに示されている。

## 【0090】

この図3に示されるように、光増幅部161は、チャンネル0からチャンネル127の総計128チャンネルを有する遅延部167と、この遅延部167のチャンネル0からチャンネル127の総計128チャンネルのそれぞれの出力段に接続されたファイバ増幅器168<sub>1</sub>～168<sub>128</sub>と、これらのファイバ増幅器168<sub>1</sub>～168<sub>128</sub>のそれぞれに狭帯域フィルタ169<sub>1</sub>～169<sub>128</sub>及び光アイソレータ170<sub>1</sub>～170<sub>128</sub>をそれぞれ介して接続された最終段のファイバ増幅器171<sub>1</sub>～171<sub>128</sub>とを有する。

1<sub>128</sub>等を備えている。この場合、図3からも明らかなように、ファイバ増幅器 1 6 8<sub>n</sub>、狭帯域化フィルタ 1 6 9<sub>n</sub>、光アイソレータ 1 7 0<sub>n</sub>、及びファイバ増幅器 1 7 1<sub>n</sub> ( $n = 1, 2, \dots, 128$ ) によって、それぞれ光経路 1 7 2<sub>n</sub> ( $n = 1, 2, \dots, 128$ ) が構成されている。

#### 【0091】

光増幅部 1 6 1 の上記構成各部について更に詳述すると、前記遅延部 1 6 7 は、総計 1 2 8 チャンネルのチャンネルを有し、各チャンネルの出力に所定の遅延時間（ここでは、3 ns）を与えるためのものである。この遅延部 1 6 7 は、本実施形態では、EOM 1 6 0 C から出力されるパルス光を 3 5 dB（3 1 6 2 倍）の光増幅を行うエルビウム（Er）・ドープ・ファイバ増幅器（EDFA）と、この EDFA の出力をチャンネル 0 ～ 3 の 4 出力に並列分割する光分岐手段であるスプリッタ（平板導波路 1 × 4 スプリッタ）と、このスプリッタのチャンネル 0 ～ 3 の各出力端に接続された各々長さの異なる 4 本の光ファイバと、これら 4 本の光ファイバの出力をそれぞれチャンネル 0 ～ 3 に 3 2 分割する 4 つのスプリッタ（平板導波路 1 × 3 2 スプリッタ）と、各スプリッタのチャンネル 0 を除くチャンネル 1 ～ 3 にそれぞれ接続された長さの異なる各 3 1 本（総計 1 2 4 本）の光ファイバとを含んで構成されている。以下、上記各スプリッタ（平板導波路 1 × 3 2 スプリッタ）の 0 ～ 3 1 チャンネルを総称してブロックと呼ぶ。

#### 【0092】

これを更に詳述すると、上記初段の EDFA から出力されるパルス光は、ピーク出力約 6 3 W、平均出力約 6 . 3 mW となる。このパルス光がスプリッタ（平板導波路 1 × 4 スプリッタ）によりチャンネル 0 ～ 3 の 4 出力に並列分割され、各チャンネルの出力光には、上記 4 本の光ファイバ長に対応した遅延が与えられる。例えば本実施形態では、光ファイバ中の光の伝搬速度を  $2 \times 10^8 \text{ m/s}$  であるとし、スプリッタ（平板導波路 1 × 4 スプリッタ）のチャンネル 0、1、2、3 にそれぞれ 0 . 1 m、1 9 . 3 m、3 8 . 5 m、5 7 . 7 m の長さの光ファイバ（以下、「第 1 の遅延ファイバ」と呼ぶ）が接続されている。この場合、各第 1 の遅延ファイバ出口での隣り合うチャンネル間の光の遅延は 9 6 ns となる。

#### 【0093】

また、上記 4 つのスプリッタ（平板導波路  $1 \times 3$  2 スプリッタ）のチャンネル 1 ～ 3 1 には、それぞれ  $0.6 \times N$  メートル（ $N$  はチャンネル番号）の長さの光ファイバ（以下、「第 2 の遅延ファイバ」と呼ぶ）が接続されている。この結果、各ブロック内の隣り合うチャンネル間では  $3 \text{ ns}$  の遅延が与えられ、各ブロックのチャンネル 0 出力に対し、チャンネル 3 1 出力は、 $3 \times 3 1 = 9 3 \text{ ns}$  の遅延が与えられる。

## 【 0 0 9 4 】

一方、第 1 から第 4 までの各ブロック間には、前記のように第 1 の遅延ファイバによって、各ブロックの入力時点で各々  $9 6 \text{ ns}$  の遅延が与えられている。従って、第 2 ブロックのチャンネル 0 出力は第 1 ブロックのチャンネル 0 出力に対し  $9 6 \text{ ns}$  の遅延となり、第 1 ブロックのチャンネル 3 1 との遅延は  $3 \text{ ns}$  となる。このことは、第 2 ～ 第 3、第 3 ～ 第 4 のブロック間においても同様である。この結果、全体の出力として総計 1 2 8 チャンネルの出力端で、隣り合うチャンネル間に  $3 \text{ ns}$  の遅延を持つパルス光が得られる。

## 【 0 0 9 5 】

以上の分岐及び遅延により、総計 1 2 8 チャンネルの出力端では、隣り合うチャンネル間で  $3 \text{ ns}$  の遅延を持つパルス光が得られるが、このとき各々の出力端で観測される光パルスは、EOM 1 6 0 C によって変調されたパルスと同じ  $1 0 0 \text{ kHz}$ （パルス周期  $1 0 \mu \text{ s}$ ）である。従って、レーザ光発生部全体として見ると、1 2 8 パルスが  $3 \text{ ns}$  間隔で発生した後、 $9.62 \mu \text{ s}$  の間隔を置いて次のパルス列が発生するという繰り返しが  $1 0 0 \text{ kHz}$  で行われる。即ち全体の出力は  $1 2 8 \times 1 0 0 \times 1 0^3 = 1.28 \times 1 0^7$  パルス／秒となる。

## 【 0 0 9 6 】

なお本実施形態では、分割数を 1 2 8 とし、また遅延用ファイバとして短いものを用いた例について説明した。このため各パルス列の間に  $9.62 \mu \text{ s}$  の発光しない間隔が生じたが、分割数を増加させる、または遅延用ファイバをより長くして適切な長さとする、あるいはこれらを組み合わせて用いることにより、パルス間隔を完全な等間隔とすることも可能である。

## 【 0 0 9 7 】

前記ファイバ増幅器 168<sub>n</sub> ( $n=1, 2, \dots, 128$ ) としては、ここでは、通常通信で用いられているものと同様に光ファイバのモードフィールド径（以下「モード径」という）が 5～6  $\mu\text{m}$  のエルビウム (Er) ・ドープ・ファイバ増幅器 (EDFA) が用いられている。このファイバ増幅器 168<sub>n</sub> によって、遅延部 167 の各チャネルからの出力光が、所定の増幅利得に応じて増幅される。なお、このファイバ増幅器 168<sub>n</sub> の励起光源等については後述する。

#### 【0098】

前記狭帯域フィルタ 169<sub>n</sub> ( $n=1, 2, \dots, 128$ ) は、ファイバ増幅器 168<sub>n</sub> で発生する ASE 光をカットし、かつ DFB 半導体レーザ 160A の出力波長（波長幅は 1 pm 程度以下）を透過させることで、透過光の波長幅を実質的に狭帯化するものである。これにより、ASE 光が後段のファイバ増幅器 171<sub>n</sub> に入射してレーザ光の増幅利得を低下させるのを防止し、あるいは ASE ノイズの伝播によるレーザ光の散乱を防止することができる。ここで、狭帯域フィルタ 169<sub>n</sub> はその透過波長幅が 1 pm 程度であることが好ましいが、ASE 光の波長幅は数十 nm 程度であるので、現時点で得られる透過波長幅が 100 pm 程度の狭帯域フィルタを用いても実用上問題がない程度に ASE 光をカットすることができる。

#### 【0099】

また、本実施形態では、後述するように DFB 半導体レーザ 160A の出力波長を積極的に変化させることがあるので、その出力波長の可変幅（本実施形態の露光装置では一例として  $\pm 20$  pm 程度）に応じた透過波長幅（可変幅と同程度以上）を持つ狭帯域フィルタを用いておくことが好ましい。なお、露光装置に適用されるレーザ装置ではその波長幅が 1 pm 程度以下に設定される。

#### 【0100】

前記光アイソレータ 170<sub>n</sub> ( $n=1, 2, \dots, 128$ ) は、先に説明した光アイソレータ 160B と同様に、戻り光の影響を低減するためのものである。

#### 【0101】

前記ファイバ増幅器 171<sub>n</sub> ( $n=1, 2, \dots, 128$ ) としては、ここでは、光ファイバ中での非線形効果による増幅光のスペクトル幅の増加を避けるた

め光ファイバのモード径が通常通信で用いられているもの（ $5\sim 6\ \mu\text{m}$ ）よりも広い、例えば $20\sim 30\ \mu\text{m}$ の大モード径のEDFAが用いられている。このファイバ増幅器171<sub>n</sub>は、前述したファイバ増幅器168<sub>n</sub>で増幅された遅延部167の各チャンネルからの光出力を更に増幅する。一例として、遅延部167での各チャンネルの平均出力約 $50\ \mu\text{W}$ 、全チャンネルでの平均出力約 $6.3\ \text{mW}$ を2段のファイバ増幅器168<sub>n</sub>、171<sub>n</sub>によって合計46dB（40600倍）の増幅を行うものとする、各チャンネルに対応する光経路172<sub>n</sub>の出力端（ファイバ増幅器171<sub>n</sub>を構成する光ファイバの出力端）では、ピーク出力20kW、パルス幅1ns、パルス繰り返し周波数100kHz、平均出力2W、全チャンネルでの平均出力256Wを得る。なお、このファイバ増幅器171<sub>n</sub>の励起光源等についても後述する。

#### 【0102】

本実施形態では、遅延部167での各チャンネルに対応する光経路172<sub>n</sub>の出力端、すなわちファイバ増幅器171<sub>n</sub>を構成する各光ファイバの出力端は、バンドル状に束ねられ、図4に示されるような断面形状を有するバンドルファイバ173が形成されている。このとき、各光ファイバのクラッド直径は $125\ \mu\text{m}$ 程度であることから、128本を束ねた出力端でのバンドルの直径は約2mm以下とすることができる。本実施形態では、バンドルファイバ173は最終段のファイバ増幅器171<sub>n</sub>の出力端をそのまま用いて形成しているが、最終段のファイバ増幅器171<sub>n</sub>に無ドープの光ファイバを結合させ、その出力端でバンドルファイバを形成することも可能である。

#### 【0103】

なお、標準的なモード径を持つ前段のファイバ増幅器168<sub>n</sub>と、上記モード径の広い最終段のファイバ増幅器171<sub>n</sub>との接続は、テーパ状にモード径が増加する光ファイバを用いて行われている。

#### 【0104】

次に、図5に基づいて各ファイバ増幅器の励起用光源等について説明する。図5には、光増幅部161を構成するファイバ増幅器及びその周辺部が、波長変換部163の一部とともに概略的に示されている。

## 【0105】

この図5において、第1段のファイバ増幅器168<sub>n</sub>にはその励起用の半導体レーザ178がファイバ結合されるとともに、この半導体レーザ178の出力が波長分割多重化装置(Wavelength Division Multiplexer:WDM)179を通してファイバ増幅器用ドープ・ファイバに入力し、それによりこのドープ・ファイバが励起されるようになっている。

## 【0106】

一方大モード径をもつファイバ増幅器171<sub>n</sub>では、上記のモード径の大きいファイバ増幅器用ドープ・ファイバを励起するための励起用光源としての半導体レーザ174を、ファイバ増幅器用ドープ・ファイバの径に合わせた大モード径ファイバにファイバ結合し、この半導体レーザ174の出力をWDM176を用いて、光増幅器用ドープ・ファイバに入力し、ドープ・ファイバを励起する。

## 【0107】

この大モード径ファイバ(ファイバ増幅器)171<sub>n</sub>で増幅されたレーザ光は波長変換部163に入射し、ここで紫外レーザ光に波長変換される。なお、この波長変換部163の構成等については後述する。

## 【0108】

大モード径ファイバ(ファイバ増幅器)171<sub>n</sub>を伝播する増幅されるべきレーザ光(信号)は、主に基本モードであることが望ましく、これは、シングルモードあるいはモード次数の低いマルチモードファイバにおいて、主に基本モードを選択的に励起することにより実現できる。

## 【0109】

本実施形態では、大モード径ファイバに結合された高出力半導体レーザを、前方向から4個及び後方向から4個ファイバ結合している。ここで、励起用半導体レーザ光を効率良く光増幅用ドープ・ファイバに結合するためには、光増幅用ドープ・ファイバとして、クラッドが2重構造となったダブルクラッド構造の光ファイバを用いることが望ましい。このとき、励起用半導体レーザ光は、WDM176により、ダブルクラッドの内側クラッドに導入される。

## 【0110】



前記半導体レーザ 178、174 は、光量制御装置 16C によって制御されるようになっている。

【0111】

また、本実施形態では、光経路 172<sub>n</sub> を構成する光ファイバとしてファイバ増幅器 168<sub>n</sub>、171<sub>n</sub> が設けられているため、各ファイバ増幅器のゲインの差が各チャネルの光出力のばらつきとなる。このため、本実施形態では、各チャネルのファイバ増幅器 (168<sub>n</sub>、171<sub>n</sub>) で出力の一部が分岐され、それぞれの分岐端に設けられた光電変換素子 180、181 によってそれぞれ光電変換されるようになっている。これらの光電変換素子 180、181 の出力信号が光量制御装置 16C に供給されるようになっている。

【0112】

光量制御装置 16C では、各ファイバ増幅器からの光出力が各増幅段で一定になるように (即ちバランスするように)、各励起用半導体レーザ (178、174) のドライブ電流をフィードバック制御するようになっている。

【0113】

さらに、本実施形態では、図 5 に示されるように、波長変換部 163 の途中でビームスプリッタにより分岐された光が光電変換素子 182 によって光電変換され、該光電変換素子 182 の出力信号が光量制御装置 16C に供給されるようになっている。光量制御装置 16C では、この光電変換素子 182 の出力信号に基づいて波長変換部 163 における光強度をモニタし、波長変換部 163 からの光出力が所定の光出力となるように、励起用半導体レーザ 178、174 の少なくとも一方のドライブ電流をフィードバック制御する。

【0114】

このような構成とすることにより、各増幅段毎に各チャネルのファイバ増幅器の増幅率が一定化されるため、各ファイバ増幅器間に偏った負荷がかかることなく全体として均一な光強度が得られる。また、波長変換部 163 における光強度をモニタすることにより、予定される所定の光強度を各増幅段にフィードバックし、所望の紫外光出力を安定して得ることができる。

【0115】

なお、光量制御装置 16C については、後に更に詳述する。

【0116】

上述のようにして構成された光増幅部 161 (バンドルファイバ 173 を形成する各光ファイバ出力端) からはパルス光がすべて円偏光に揃えられて出力される。これら円偏光であるパルス光は、四分の一波長板 162 (図 2 参照) によって、すべて偏光方向が同一方向となる直線偏光に変換され、次段の波長変換部 163 に入射する。

【0117】

前記波長変換部 163 は、複数の非線形光学結晶を含み、前記増幅されたパルス光 (波長  $1.544\ \mu\text{m}$  の光) をその 8 倍高調波又は 10 倍高調波に波長変換して、ArF エキシマレーザと同じ出力波長 ( $193\ \text{nm}$ ) あるいは  $F_2$  レーザと同じ出力波長 ( $157\ \text{nm}$ ) のパルス紫外光を発生する。

【0118】

図 6 (A)、(B) には、この波長変換部 163 の構成例が示されている。ここで、これらの図に基づいて波長変換部 163 の具体例について説明する。

【0119】

図 6 (A) は、バンドルファイバ 173 の出力端から射出される波長  $1.544\ \mu\text{m}$  の基本波を、非線形光学結晶を用いて 8 倍波 (高調波) に波長変換して、ArF エキシマレーザと同じ波長である  $193\ \text{nm}$  の紫外光を発生する構成例を示す。また、図 6 (B) は、バンドルファイバ 173 の出力端から射出される波長  $1.57\ \mu\text{m}$  の基本波を非線形光学結晶を用いて 10 倍波の高調波発生を行い、 $F_2$  レーザと同じ波長である  $157\ \text{nm}$  の紫外光を発生する構成例を示す。

【0120】

図 6 (A) の波長変換部では、基本波 (波長  $1.544\ \mu\text{m}$ )  $\rightarrow$  2 倍波 (波長  $772\ \text{nm}$ )  $\rightarrow$  3 倍波 (波長  $515\ \text{nm}$ )  $\rightarrow$  4 倍波 (波長  $386\ \text{nm}$ )  $\rightarrow$  7 倍波 (波長  $221\ \text{nm}$ )  $\rightarrow$  8 倍波 (波長  $193\ \text{nm}$ ) の順に波長変換が行われる。

【0121】

これを更に詳述すると、バンドルファイバ 173 の出力端から出力される波

長 1. 5 4 4  $\mu\text{m}$  (周波数  $\omega$ ) の基本波は、1 段目の非線形光学結晶 5 3 3 に入射する。基本波がこの非線形光学結晶 5 3 3 を通る際に、2 次高調波発生により基本波の周波数  $\omega$  の 2 倍、すなわち周波数  $2\omega$  (波長は  $1/2$  の 7 7 2 nm) の 2 倍波が発生する。

【0 1 2 2】

この 1 段目の非線形光学結晶 5 3 3 として、 $\text{LiB}_3\text{O}_5$  (LBO) 結晶が用いられ、基本波を 2 倍波に波長変換するための位相整合に LBO 結晶の温度調節による方法、NCPM (Non-Critical Phase Matching) が使用される。NCPM は、非線形光学結晶内での基本波と第二高調波との角度ずれ (Walk-off) が起こらないため高効率で 2 倍波への変換を可能にし、また発生した 2 倍波は Walk-off によるビームの変形も受けないため有利である。

【0 1 2 3】

非線形光学結晶 5 3 3 で波長変換されずに透過した基本波と、波長変換で発生した 2 倍波とは、次段の波長板 5 3 4 でそれぞれ半波長、1 波長の遅延が与えられて、基本波のみその偏光方向が 90 度回転し、2 段目の非線形光学結晶 5 3 6 に入射する。2 段目の非線形光学結晶 5 3 6 として LBO 結晶が用いられるとともに、その LBO 結晶は 1 段目の非線形光学結晶 (LBO 結晶) 5 3 3 とは温度が異なる NCPM で使用される。この非線形光学結晶 5 3 6 では、1 段目の非線形光学結晶 5 3 3 で発生した 2 倍波と、波長変換されずにその非線形光学結晶 5 3 3 を透過した基本波とから和周波発生により 3 倍波 (波長 5 1 5 nm) を得る。

【0 1 2 4】

次に、非線形光学結晶 5 3 6 で得られた 3 倍波と、波長変換されずにその非線形光学結晶 5 3 6 を透過した基本波および 2 倍波とは、ダイクロイック・ミラー 5 3 7 により分離され、ここで反射された 3 倍波は集光レンズ 5 4 0、及びダイクロイック・ミラー 5 4 3 を通って 4 段目の非線形光学結晶 5 4 5 に入射する。一方、ダイクロイック・ミラー 5 3 7 を透過した基本波および 2 倍波は、集光レンズ 5 3 8 を通って 3 段目の非線形光学結晶 5 3 9 に入射する。

【0 1 2 5】

3 段目の非線形光学結晶 539 としては LBO 結晶が用いられ、基本波が波長変換されずにその LBO 結晶を透過するとともに、2 倍波が LBO 結晶で 2 次高調波発生により 4 倍波（波長 386 nm）に変換される。非線形光学結晶 539 で得られた 4 倍波とそれを透過した基本波とは、ダイクロイック・ミラー 541 により分離され、ここを透過した基本波は集光レンズ 544 を通るとともに、ダイクロイックミラー 546 で反射されて 5 段目の非線形光学結晶 548 に入射する。一方、ダイクロイック・ミラー 541 で反射された 4 倍波は、集光レンズ 542 を通ってダイクロイック・ミラー 543 に達し、ここでダイクロイック・ミラー 537 で反射された 3 倍波と同軸に合成されて 4 段目の非線形光学結晶 545 に入射する。

## 【0126】

4 段目の非線形光学結晶 545 としては、 $\beta$ -BaB<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (BBO) 結晶が用いられ、3 倍波と 4 倍波とから和周波発生により 7 倍波（波長 221 nm）を得る。非線形光学結晶 545 で得られた 7 倍波は集光レンズ 547 を通るとともに、ダイクロイック・ミラー 546 で、ダイクロイック・ミラー 541 を透過した基本波と同軸に合成されて、5 段目の非線形光学結晶 548 に入射する。

## 【0127】

5 段目の非線形光学結晶 548 として LBO 結晶が用いられ、基本波と 7 倍波とから和周波発生により 8 倍波（波長 193 nm）を得る。上記構成において、7 倍波発生用 BBO 結晶 545、及び 8 倍波発生用 LBO 結晶 548 のかわりに、CsLiB<sub>6</sub>O<sub>10</sub> (CLBO) 結晶、あるいは Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> (LB4) 結晶を用いることも可能である。

## 【0128】

この図 6 (A) の構成例では、4 段目の非線形光学結晶 545 に 3 倍波と 4 倍波とが互いに異なる光路を通過して入射するので、3 倍波を集光するレンズ 540 と、4 倍波を集光するレンズ 542 とを別々の光路に置くことができる。3 段目の非線形光学結晶 539 で発生した 4 倍波はその断面形状が Walk-off 現象により長円形になっている。このため、4 段目の非線形光学結晶 545 で良好な変換効率を得るためには、その 4 倍波のビーム整形を行うことが望ましい。この場合、

集光レンズ 540、542 を別々の光路に配置しているので、例えばレンズ 542 としてシリンドリカルレンズ対を用いることができ、4 倍波のビーム整形を容易に行うことが可能となる。このため、4 段目の非線形光学結晶（BBO 結晶）545 での 3 倍波との重なりを良好にし、変換効率を高めることが可能である。

## 【0129】

さらに、5 段目の非線形光学結晶 548 に入射する基本波を集光するレンズ 544 と、7 倍波を集光するレンズ 547 とを別々の光路に置くことができる。4 段目の非線形光学結晶 545 で発生した 7 倍波はその断面形状が Walk-off 現象により長円形になっている。このため、5 段目の非線形光学結晶 548 で良好な変換効率を得るためには、その 7 倍波のビーム整形を行うことが好ましい。本実施例では、集光レンズ 544、547 を別々の光路に配置することができるので、例えばレンズ 547 としてシリンドリカルレンズ対を用いることができ、7 倍波のビーム整形を容易に行うことが可能となる。このため、5 段目の非線形光学結晶（LBO 結晶）548 での基本波との重なりを良好にし、変換効率を高めることが可能である。

## 【0130】

なお、2 段目の非線形光学結晶 536 と 4 段目の非線形光学結晶 545 との間の構成は図 6（A）に限られるものではなく、非線形光学結晶 536 から発生してダイクロイック・ミラー 537 で反射される 3 倍波と、非線形光学結晶 536 から発生してダイクロイック・ミラー 537 を透過する 2 倍波を非線形光学結晶 539 で波長変換して得られる 4 倍波とが同時に非線形光学結晶 545 に入射するように、両非線形光学結晶 536、545 間の 2 つの光路長が等しくなっていれば、いかなる構成であっても構わない。このことは 3 段目の非線形光学結晶 539 と 5 段目の非線形光学結晶 548 との間でも同様である。

## 【0131】

発明者の行った実験によれば、図 6（A）の場合、各チャネル当たりの 8 倍波（波長 193 nm）の平均出力は、45.9 mW であった。従って、全 128 チャネルを合わせたバンドルからの平均出力は 5.9 W となり、露光装置用光源として十分な出力の、波長 193 nm の紫外光を提供することができる。

## 【0132】

この場合、8倍波（193 nm）の発生に、現在、市販品として良質の結晶が容易に入手可能なLBO結晶が用いられている。このLBO結晶は、193 nmの紫外光の吸収係数が非常に小さく、結晶の光損傷が問題とならないため耐久性の面で有利である。

## 【0133】

また、8倍波（例えば波長193 nm）の発生部ではLBO結晶を角度位相整合させて用いるが、この位相整合角が大きいために実効非線形光学定数（ $d_{eff}$ ）が小さくなる。そこで、このLBO結晶に温度制御機構を設け、LBO結晶を高温で用いることが好ましい。これにより、位相整合角を小さくすることができる、即ち上記定数（ $d_{eff}$ ）を増加させることができ、8倍波発生効率を向上させることができる。

## 【0134】

図6（B）の波長変換部では、基本波（波長1.57  $\mu\text{m}$ ）→2倍波（波長785 nm）→4倍波（波長392.5 nm）→8倍波（波長196.25 nm）→10倍波（波長157 nm）の順に波長変換する。本構成例では2倍波発生から8倍波発生までの各波長変換段において、各波長変換段に入射された波長の2次高調波発生を行っている。

## 【0135】

また、本構成例では波長変換に使用する非線型光学結晶として、基本波から2次高調波発生により2倍波を発生する非線形光学結晶602としてLBO結晶を使用し、2倍波から2次高調波発生により4倍波を発生する非線形光学結晶604としてLBO結晶を使用する。さらに、4倍波から2次高調波発生により8倍波を発生する非線形光学結晶609には $\text{Sr}_2\text{Be}_2\text{B}_2\text{O}_7$ （SBB O）結晶を使用し、2倍波と8倍波とから和周波発生により10倍波（波長157 nm）を発生する非線形光学結晶611にはSBB O結晶を使用する。

## 【0136】

なお、非線形光学結晶602から発生する2倍波は、集光レンズ603を通過して非線形光学結晶604に入射し、この非線形光学結晶604は前述の4倍波と

波長変換されない2倍波とを発生する。次に、ダイクロイック・ミラー605を透過する2倍波は集光レンズ606を通るとともに、ダイクロイック・ミラー607で反射されて非線形光学結晶611に入射する。一方、ダイクロイック・ミラー605で反射された4倍波は、集光レンズ608を通して非線形光学結晶609に入射し、ここで発生される8倍波は集光レンズ610、及びダイクロイック・ミラー607を通して非線形光学結晶611に入射する。さらに非線形光学結晶611は、ダイクロイック・ミラー607で同軸に合成される2倍波と8倍波とから和周波発生により10倍波（波長157nm）を発生する。

## 【0137】

ところで、本構成例では2段目の非線形光学結晶604から発生する2倍波と4倍波とをダイクロイック・ミラー605で分岐することで、ここを透過した2倍波と、4倍波を非線形光学結晶609で波長変換して得られる8倍波とが互いに異なる光路を通して4段目の非線形光学結晶611に入射するように構成したが、ダイクロイック・ミラー605、607を用いずに4つの非線形光学結晶602、604、609、611を同一光軸上に配置しても良い。

## 【0138】

但し、本構成例では2段目の非線形光学結晶604で発生した4倍波はその断面形状がWalk-off現象により長円形になっている。このため、このビームを入力とする4段目の非線形光学結晶611で良好な変換効率を得るためには、入射ビームとなる4倍波のビーム形状を整形し、2倍波との重なりを良好にすることが望ましい。本構成例では、集光レンズ606、608を別々の光路に配置することができるので、例えばレンズ608としてシリンドリカルレンズを用いることが可能になり、4倍波のビーム整形を容易に行うことができる。このため、4段目の非線形光学結晶611での2倍波との重なりを良好にし、変換効率を高めることが可能である。

## 【0139】

なお、上記図6（A）、（B）に示される波長変換部は一例であって、本発明の波長変換部の構成がこれに限定されないことは勿論である。

## 【0140】

図 2 に戻り、前記ビームモニタ機構 1 6 4 は、ここではファブリペロー・エタロン (Fabry-Perot etalon: 以下、「エタロン素子」ともいう) 及びフォトダイオード等の光電変換素子から成るエネルギーモニタ (いずれも図示省略) から構成されている。ビームモニタ機構 1 6 4 を構成するエタロン素子に入射した光は、エタロン素子の共鳴周波数と入射光の周波数との周波数差に対応した透過率で透過し、その透過光強度を検出するフォトダイオード等の出力信号がレーザ制御装置 1 6 B に供給される。レーザ制御装置 1 6 B ではこの信号に所定の信号処理を施すことにより、ビームモニタ機構 1 6 4、具体的にはエタロン素子に対する入射光の光学特性に関する情報 (具体的は、入射光の中心波長及び波長幅 (スペクトル半値幅) 等) を得る。そして、この光学特性に関する情報は、リアルタイムで主制御装置 5 0 に通知される。

## 【 0 1 4 1 】

エタロン素子の生成する透過光強度の周波数特性は、雰囲気温度や圧力の影響を受け、特にその共鳴周波数 (共鳴波長) は温度依存性がある。このため、このエタロン素子の検出結果に基づいてレーザ光源 1 6 0 A から発振されるレーザ光の中心波長やスペクトル半値幅を精度良く制御するためには、この共鳴波長の温度依存性を調べておくことが重要である。本実施形態では、この共鳴波長の温度依存性を予め計測し、この計測結果が温度依存性マップとして主制御装置 5 0 に併設された記憶装置としてのメモリ 5 1 (図 1 参照) に記憶されている。そして、主制御装置 5 0 では、ビームモニタ機構 1 6 4 の絶対波長キャリブレーションの際等に、エタロン素子の透過率が最大となる共鳴波長 (検出基準波長) が設定波長に正確に一致するようにするため、レーザ制御装置 1 6 B に指示を与えて、ビームモニタ機構 1 6 4 内のエタロン素子の温度を積極的に制御するようになっている。

## 【 0 1 4 2 】

また、ビームモニタ機構 1 6 4 を構成するエネルギーモニタの出力は、主制御装置 5 0 に供給されており、主制御装置 5 0 ではエネルギーモニタの出力に基づいてレーザ光のエネルギーパワーを検出し、レーザ制御装置 1 6 B を介して D F B 半導体レーザ 1 6 0 A で発振されるレーザ光の光量を必要に応じて制御したり、D F



B半導体レーザ160Aをオフしたりする。但し、本実施形態では、後述するように、通常の光量制御（露光量制御）は、主として光量制御装置16Cにより、EOM160Cの出力パルス光のピークパワーあるいは周波数の制御、又は光増幅部161を構成する各ファイバ増幅器の出力光のオン・オフ制御によって行われるので、レーザ光のエネルギーパワーが何らかの原因で大きく変動した場合に主制御装置50がレーザ制御装置16Bを上記の如く制御することとなる。

## 【0143】

前記吸収セル165は、DFB半導体レーザ160Aの発振波長の絶対波長キャリブレーション、すなわちビームモニタ機構164の絶対波長キャリブレーションのための絶対波長源である。本実施形態では、この吸収セル165として、レーザ光源として発振波長 $1.544\mu\text{m}$ のDFB半導体レーザ160Aが用いられている関係から、この波長近傍の波長帯域に吸収線が密に存在するアセチレンの同位体が用いられている。

## 【0144】

なお、後述するように、レーザ光の波長のモニタ用の光として、基本波とともにあるいはこれに代えて、上述した波長変換部163の中間波（2倍波、3倍波、4倍波等）あるいは波長変換後の光を選択する場合には、それらの中間波等の波長帯域に吸収線が密に存在する吸収セルを用いれば良い。例えば、波長のモニタ用の光として、3倍波を選択する場合には、波長 $503\text{nm}\sim 530\text{nm}$ の近傍に吸収線が密に存在するヨウ素分子を吸収セルとして用い、そのヨウ素分子の適切な吸収線を選んでその波長を絶対波長とすれば良い。

## 【0145】

また、絶対波長源としては、吸収セルに限らず、絶対波長光源を用いても良い。

## 【0146】

前記レーザ制御装置16Bは、ビームモニタ機構164の出力に基づいてレーザ光の中心波長及び波長幅（スペクトル半値幅）を検出し、中心波長が所望の値（設定波長）となるようにDFB半導体レーザ160Aの温度制御（及び電流制御）をフィードバック制御にて行う。本実施形態では、DFB半導体レーザ16

0 Aの温度を0.001℃単位で制御することが可能となっている。

【0147】

また、このレーザ制御装置16Bは、主制御装置50からの指示に応じて、DFB半導体レーザ160Aのパルス出力と連続出力との切替、及びそのパルス出力時における出力間隔やパルス幅などの制御を行うとともに、パルス光の出力変動を補償するように、DFB半導体レーザ160Aの発振制御を行う。

【0148】

このようにして、レーザ制御装置16Bでは、発振波長を安定化して一定の波長に制御したり、あるいは出力波長を微調整する。逆に、このレーザ制御装置16Bは、主制御装置50からの指示に応じて、DFB半導体レーザ160Aの発振波長を積極的に変化させてその出力波長を調整することもある。

【0149】

例えば、前者によれば、波長変動による投影光学系PLの収差（結像特性）の発生、又はその変動が防止され、パターン転写中にその像特性（像質などの光学的特性）が変化することがなくなる。

【0150】

また、後者によれば、露光装置が組立、調整される製造現場と露光装置の設置場所（納入先）との標高差や気圧差、更には環境（クリーンルーム内の雰囲気）の違いなどに応じて生じる投影光学系PLの結像特性（収差など）の変動を相殺でき、納入先で露光装置の立ち上げに要する時間を短縮することが可能になる。更に、後者によれば、露光装置の稼働中に、露光用照明光の照射、及び大気圧変化などに起因して生じる投影光学系PLの収差、投影倍率、及び焦点位置などの変動も相殺でき、常に最良の結像状態でパターン像を基板上に転写することが可能となる。

【0151】

前記光量制御装置16Cは、前述したように、光増幅部161内のファイバ増幅器168<sub>n</sub>、171<sub>n</sub>の光出力を検出する光電変換素子180、181の出力に基づいて各励起用半導体レーザ（178、174）のドライブ電流をフィードバック制御して、各増幅段毎に各チャンネルのファイバ増幅器の増幅率を一定化させ

る機能と、波長変換部 163 途中でビームスプリッタにより分岐された光を検出する光電変換素子 182 の出力信号に基づいて、励起用半導体レーザ 178、174 の少なくとも一方のドライブ電流をフィードバック制御して予定される所定の光強度を各増幅段にフィードバックし、所望の紫外光出力を安定させる機能とを有する。

【0152】

更に、本実施形態では、光量制御装置 16C は、次のような機能をも有している。

【0153】

すなわち、光量制御装置 16C は、

- ① 主制御装置 50 からの指示に応じて、バンドルファイバ 173 を構成する各チャンネルのファイバの出力、すなわち各光経路  $172_n$  の出力を個別にオン・オフ制御することにより、バンドル全体での平均光出力の制御を行う機能（以下、便宜上「第 1 の機能」と呼ぶ）と、
- ② 主制御装置 50 からの指示に応じて、EOM 160C から出力されるパルス光の周波数を制御することにより、単位時間当たりの光増幅部 161 の各チャンネルの平均光出力（出力エネルギー）、すなわち単位時間当たりの各光経路  $172_n$  からの出力光の強度を制御する機能（以下、便宜上「第 2 の機能」と呼ぶ）と、
- ③ 主制御装置 50 からの指示に応じて、EOM 160C から出力されるパルス光のピークパワーを制御することにより、単位時間当たりの光増幅部 161 の各チャンネルの平均光出力（出力エネルギー）、すなわち単位時間当たりの各光経路  $172_n$  からの出力光の強度を制御する機能（以下、便宜上「第 3 の機能」と呼ぶ）と、を有する。

【0154】

以下、上記第 1 ～第 3 の機能について、詳述する。

【0155】

まず、光量制御装置 16C は、上記第 1 の機能における各光経路  $172_n$  の出力のオン・オフを、各チャンネルの最終段のファイバ増幅器  $171_n$  からの出力をオン・オフすることにより行う。この場合、光量制御装置 16C では、ファイバ

増幅器励起用半導体レーザ 1 7 4 をオン・オフする、すなわち半導体レーザ 1 7 4 からの励起光の強度を所定レベルと零レベルとのいずれかに択一的に設定することにより行うこともできるし、半導体レーザ 1 7 4 のドライブ電流の電流値を調整することにより、半導体レーザ 1 7 4 からの励起光の強度をファイバ増幅器 1 7 1<sub>n</sub>が増幅可能状態となる第 1 レベルと、ファイバ増幅器 1 7 1<sub>n</sub>が増幅不能状態となる第 2 レベルとのいずれかに択一的に設定することにより行なうこともできる。増幅不能状態では、光の吸収が大きくなり、ファイバ増幅器からの出力は殆ど零となるので、各光経路 1 7 2<sub>n</sub>の出力がオフとなる。

## 【0 1 5 6】

半導体レーザ 1 7 4 をオン・オフする場合には、半導体レーザ 1 7 4 をオフにしている状態では、その分の消費電力はなくなるので、エネルギーセーブが可能になる。一方、半導体レーザ 1 7 4 からの励起光の強度を上記第 1 レベルと第 2 レベルとで切り換える場合には、第 1 レベルと第 2 レベルとは固定値であっても良いが、固定値でなくても良い。すなわち、ファイバ増幅器では、励起光の強度がある値を境として、上にいくか下にいくかで、増幅可能状態となるか増幅不能状態となるかが定まるからである。

## 【0 1 5 7】

この光量制御装置 1 6 C の第 1 の機能によると、バンドル全体での平均光出力（光量）は、最大出力光量の 1 / 1 2 8 刻みで（約 1 % 以下毎）に制御可能である。すなわち、ダイナミックレンジが 1 ~ 1 / 1 2 8 という広い範囲に設定可能である。各光経路 1 7 2<sub>n</sub>は同じ構成部材を用いて構成されているので、設計上は、各光経路 1 7 2<sub>n</sub>の光出力は等しくなる筈であり、上記 1 / 1 2 8 刻みの光量制御はリニアリティの良いものとなる。

## 【0 1 5 8】

また、本実施形態では、光増幅部 1 6 1 の出力、すなわちバンドル-ファイバ 1 7 3 の出力を波長変換する波長変換部 1 6 3 が設けられているが、この波長変換部 1 6 3 出力は、各光経路 1 7 2<sub>n</sub>の出力、すなわちファイバ増幅器 1 7 1<sub>n</sub>の出力がオンであるファイバ数に比例するため、設定光量に対し、最大出力光量の 1 / 1 2 8 刻みのリニアな（約 1 % ごと）制御が原則的には可能となる筈である

## 【0159】

しかしながら、実際には、製造上の誤差等に起因して各光経路  $172_n$  の出力のばらつきや、各光経路  $172_n$  の出力に対する波長変換効率のばらつき等が存在する可能性が高いので、予め各光ファイバ（光経路  $172_n$ ）の出力のばらつき、及び各光ファイバ出力に対する波長変換効率のばらつきに等に起因する出力のばらつきを測定し、その測定結果に基づいて各光ファイバからの光出力のオン・オフ状況に対応する波長変換部 163 からの光出力の強度のマップ（オンにするファイバグループに対応した出力強度の換算表）である第 1 の出力強度マップを作成し、その第 1 の出力強度マップを主制御装置 50 に併設されたメモリ 51 内に格納している。なお、この第 1 の出力強度マップは、メモリ 51 内にテーブルの形で持たせても良いし、関数又は係数として持たせても良い。なお、後述する第 2、第 3 の出力強度マップも同様である。

## 【0160】

そして、光量制御装置では、本第 1 の機能により光量制御を行う際に、主制御装置 50 から与えられる設定光量と上記の出力強度マップとに基づいて光量制御を行うようになっている。

## 【0161】

また、光量制御装置 16C は、上記第 2 の機能における EOM160C から出力されるパルス光の周波数制御を、EOM160C に印加する矩形波（電圧パルス）の周波数を変えることにより行う。EOM160C から出力されるパルス光の周波数は EOM160C に印加する電圧パルスの周波数に一致するため、印加電圧を制御することにより出力パルス光の周波数を制御することとしたものである。

## 【0162】

本実施形態の場合、前述の如く、EOM160C に印加する矩形波の周波数は 100 kHz である。例えば、この周波数を 110 kHz とすれば、EOM160C から出力される単位時間あたりの光パルス数は 10% 増加し、このパルスが、前述と同様に、遅延部 167 により各パルス毎に順次チャンネル 0 からチャンネル

127の総計128チャンネルに振り分けられる結果、各チャンネルについて見ても単位時間当たりのパルス光は10%増加し、光パルス1個あたりの光エネルギーが同一、すなわちパルス光のピークパワーが一定であれば、単位時間当たりの各光経路172<sub>n</sub>の出力光強度（光量）も10%増加する。

#### 【0163】

また、本実施形態では、光増幅部161の各チャンネルの出力光の波長変換を行う波長変換部163が設けられているが、この波長変換部163の単位時間当たりの出力光の光量は、ピークパワーが一定であれば、各チャンネルの出力パルスの周波数に比例する。このように、本第2の機能による光量制御は、リニアリティに優れた制御となる。

#### 【0164】

但し、EOM160Cから出力されるパルス光は、遅延部167を経て、ファイバ増幅器168<sub>n</sub>、171<sub>n</sub>の入力となるため、実際には、上述のようリニアリティが得られるとは限らない。すなわち、一般に、ファイバ増幅器の増幅利得は、入力光強度依存性があるため、EOM160Cの出力光の周波数を変えたと、ファイバ増幅器168<sub>n</sub>、171<sub>n</sub>の入力光強度が変化し、その結果ファイバ増幅器168<sub>n</sub>、171<sub>n</sub>から出力されるパルス光のピークパワーが変化する場合があるからである。ファイバ増幅器168<sub>n</sub>、171<sub>n</sub>を適切に設計することにより、このピークパワー変化を小さく抑えることも可能ではあるが、ファイバ増幅器の光出力効率等の他の性能を低下させる場合もある。

#### 【0165】

そこで、本実施形態では、予めファイバ増幅器出力の入力周波数強度依存性を測定し、それに基づいて光増幅部161に入力するパルス光の周波数に応じた光増幅部161（の各チャンネル）の出力強度のマップである第2の出力強度マップ（EOMの出力光の周波数に対応した光増幅部161の出力強度の換算表）を作成し、その第2の出力強度マップをメモリ51に記憶している。

#### 【0166】

そして、光量制御装置16Cでは、本第2の機能により光量制御を行う際に、主制御装置50から与えられる設定光量と上記の第2の出力強度マップとに基づ

いて光量制御を行うようになっている。

【0167】

また、光量制御装置 16C は、上記第 3 の機能における EOM 160C から出力されるパルス光のピークパワーの制御を、EOM 160C へ印加する電圧パルスのピーク強度を制御することにより行う。EOM 160C の出力光のピークパワーは EOM 160C に印加する電圧パルスのピーク強度に依存するためである。

【0168】

また、本実施形態では、光増幅部 161 の各チャネルの出力光の波長変換を行う波長変換部 163 が設けられているが、この波長変換部 163 の出力光強度は、各光ファイバ（光経路 172<sub>n</sub>）から出力されるパルス光のピーク強度に対し、最高では高調波の次数のべき乗に比例した非線形の依存を示す。例えば、図 6（A）の 8 倍波発生による 193 nm 光発生では、193 nm 光出力強度はファイバ増幅器出力のピークパワーの最大で 8 乗に比例した強度変化を示す。

【0169】

本実施形態の場合、EOM 160C から出力されるパルス光のピークパワーの EOM 160C に印加する電圧パルスのピーク強度に対する依存性は、 $\cos(V)$  であるため、結果的に上記の波長変換部 163 の非線形な依存性は緩和されるようになっている。従って、本実施形態のように波長変換部を有する光源装置では、出力光の強度（光量）制御を EOM 160C へ印加する電圧パルスのピーク強度を制御することにより行うことは意味がある。

【0170】

但し、前述の如く、ファイバ増幅器の増幅利得は、入力光強度依存性があるため、EOM 160C から出力されるパルス光のピーク強度を変え、ファイバ増幅器 168<sub>n</sub>、171<sub>n</sub> の入力光強度が変化し、その結果ファイバ増幅器 168<sub>n</sub>、171<sub>n</sub> から出力されるパルス光のピークパワーが変化する可能性がある。ファイバ増幅器 168<sub>n</sub>、171<sub>n</sub> を適切に設計することにより、このピークパワー変化を小さく抑えることも可能ではあるが、ファイバ増幅器の光出力効率等の他の性能を低下させる場合もある。

## 【0 1 7 1】

そこで、本実施形態では、予めファイバ増幅器出力の入力パルスピーク強度依存性を測定し、それに基づいて光増幅部 1 6 1 に入力するパルス光のピーク強度に対応した光増幅部 1 6 1 (の各チャンネル) の出力強度のマップである第 3 の出力強度マップ (E O M の出力光のピーク強度に対応した光増幅部 1 6 1 の出力パルス光の強度の換算表) を作成し、その第 3 の出力強度マップをメモリ 5 1 に記憶している。この第 3 の出力強度マップは波長変換部出力である紫外光強度マップであっても良い。

## 【0 1 7 2】

そして、光量制御装置 1 6 C では、本第 3 の機能により光量制御を行う際に、主制御装置 5 0 から与えられる設定光量と上記の第 3 の出力強度マップとに基づいて光量制御を行うようになっている。

## 【0 1 7 3】

なお、D F B 半導体レーザ 1 6 0 A の出力段に、E O M 1 6 0 C の他に透過率制御用の E O M を設け、この E O M に印加する電圧を変化させることによりその E O M の透過率を変化させて、単位時間あたりの光増幅部、波長変換部からの放出エネルギーを変えることも可能である。

## 【0 1 7 4】

これまでの説明から明らかなように、光量制御装置 1 6 C による第 2、第 3 の機能では、第 1 の機能に比べて、より細やかな光源装置 1 6 の出力光の光量制御が可能である。一方、第 1 の機能は、第 2、第 3 の機能に比べて、ダイナミックレンジを広く設定することが可能である。

## 【0 1 7 5】

そこで、本実施形態では、後述する露光に際して、光量制御装置 1 6 C の上記第 1 の機能により露光量の粗調整を行い、第 2、第 3 の機能を用いて露光量の微調整を行うようになっている。これについては、後述する。

## 【0 1 7 6】

光量制御装置 1 6 C は、この他、主制御装置 5 0 からの指示に基づいてパルス出力の開始と停止なども制御する。



## 【0 1 7 7】

図 1 に戻り、前記照明光学系 1 2 は、ビーム整形光学系 1 8、オブティカルインテグレータ（ホモジナイザ）としてのフライアイレンズ系 2 2、照明系開口絞り板 2 4、ビームスプリッタ 2 6、第 1 リレーレンズ 2 8 A、第 2 リレーレンズ 2 8 B、固定レチクルブラインド 3 0 A、可動レチクルブラインド 3 0 B、光路折り曲げ用のミラー M 及びコンデンサレンズ 3 2 等を備えている。

## 【0 1 7 8】

前記ビーム整形光学系 1 8 は、光源装置 1 6 の波長変換部 1 6 3 の波長変換により発生した紫外域の光、（以下、「レーザビーム」と呼ぶ）L B の断面形状を、該レーザビーム L B の光路後方に設けられたフライアイレンズ系 2 2 に効率良く入射するように整形するもので、例えばシリンダレンズやビームエキスパンダ（いずれも図示省略）等で構成される。

## 【0 1 7 9】

前記フライアイレンズ系 2 2 は、ビーム整形光学系 1 8 から出たレーザビーム L B の光路上に配置され、レチクル R を均一な照度分布で照明するために多数の光源像からなる面光源、即ち 2 次光源を形成する。この 2 次光源から射出されるレーザビームを本明細書においては、「露光光 I L」とも呼んでいる。

## 【0 1 8 0】

フライアイレンズ系 2 2 の射出面の近傍に、円板状部材から成る照明系開口絞り板 2 4 が配置されている。この照明系開口絞り板 2 4 には、等角度間隔で、例えば通常の円形開口より成る開口絞り、小さな円形開口より成りコヒーレンスファクタである  $\sigma$  値を小さくするための開口絞り、輪帯照明用の輪帯状の開口絞り、及び変形光源法用に複数の開口を偏心させて配置して成る変形開口絞り（図 1 ではこのうちの 2 種類の開口絞りのみが図示されている）等が配置されている。この照明系開口絞り板 2 4 は、主制御装置 5 0 により制御されるモータ等の駆動装置 4 0 により回転されるようになっており、これによりレチクルパターンに応じていずれかの開口絞りが露光光 I L の光路上に選択的に設定される。

## 【0 1 8 1】

照明系開口絞り板 2 4 から出た露光光 I L の光路上に、反射率が小さく透過率

の大きなビームスプリッタ 2 6 が配置され、更にこの後方の光路上に、固定レチクルブラインド 3 0 A 及び可動レチクルブラインド 3 0 B を介在させて第 1 リレーレンズ 2 8 A 及び第 2 リレーレンズ 2 8 B から成るリレー光学系が配置されている。

## 【 0 1 8 2 】

固定レチクルブラインド 3 0 A は、レチクル R のパターン面に対する共役面から僅かにデフォーカスした面に配置され、レチクル R 上の照明領域 4 2 R を規定する矩形開口が形成されている。また、この固定レチクルブラインド 3 0 A の近傍に走査方向の位置及び幅が可変の開口部を有する可動レチクルブラインド 3 0 B が配置され、走査露光の開始時及び終了時にその可動レチクルブラインド 3 0 B を介して照明領域 4 2 R を更に制限することによって、不要な部分の露光が防止されるようになっている。

## 【 0 1 8 3 】

リレー光学系を構成する第 2 リレーレンズ 2 8 B 後方の露光光 I L の光路上には、当該第 2 リレーレンズ 2 8 B を通過した露光光 I L をレチクル R に向けて反射する折り曲げミラー M が配置され、このミラー M 後方の露光光 I L の光路上にコンデンサレンズ 3 2 が配置されている。

## 【 0 1 8 4 】

更に、照明光学系 1 2 内のビームスプリッタ 2 6 で垂直に折り曲げられる一方の光路上、他方の光路上には、インテグレータセンサ 4 6、反射光モニタ 4 7 がそれぞれ配置されている。これらインテグレータセンサ 4 6、反射光モニタ 4 7 としては、遠紫外域及び真空紫外域で感度が良く、且つ光源装置 1 6 のパルス発光を検出するために高い応答周波数を有する S i 系 P I N 型フォトダイオードが用いられている。なお、インテグレータセンサ 4 6、反射光モニタ 4 7 として G a N 系結晶を有する半導体受光素子を用いることも可能である。

## 【 0 1 8 5 】

以上の構成において、フライアイレンズ系 2 2 の入射面、可動レチクルブラインド 3 0 B の配置面、レチクル R のパターン面は、光学的に互いに共役に設定され、フライアイレンズ系 2 2 の射出面側に形成される光源面、投影光学系 P L の

フーリエ変換面（射出瞳面）は光学的に互いに共役に設定され、ケーラー照明系となっている。

#### 【0 1 8 6】

このようにして構成された照明系 1 2 の作用を簡単に説明すると、光源装置 1 6 からパルス発光されたレーザビーム L B は、ビーム整形光学系 1 8 に入射して、~~ここで後方のフライアイレンズ系 2 2 に効率良く入射するようにその断面形状~~が整形された後、フライアイレンズ系 2 2 に入射する。これにより、フライアイレンズ系 2 2 の射出側焦点面（照明光学系 1 2 の瞳面）に 2 次光源が形成される。この 2 次光源から射出された露光光 I L は、照明系開口絞り板 2 4 上のいずれかの開口絞りを通過した後、透過率が大きく反射率が小さなビームスプリッタ 2 6 に至る。このビームスプリッタ 2 6 を透過した露光光 I L は、第 1 リレーレンズ 2 8 A を経て固定レチクルブラインド 3 0 A の矩形の開口部及び可動レチクルブラインド 3 0 B を通過した後、第 2 リレーレンズ 2 8 B を通過してミラー M によって光路が垂直下方に折り曲げられた後、コンデンサレンズ 3 2 を経て、レチクルステージ R S T 上に保持されたレチクル R 上の矩形の照明領域 4 2 R を均一な照度分布で照明する。

#### 【0 1 8 7】

一方、ビームスプリッタ 2 6 で反射された露光光 I L は、集光レンズ 4 4 を介してインテグレータセンサ 4 6 で受光され、インテグレータセンサ 4 6 の光電変換信号が、不図示のピークホールド回路及び A / D 変換器を介して出力 D S (digit/pulse) として主制御装置 5 0 に供給される。このインテグレータセンサ 4 6 の出力 D S と、ウエハ W の表面上での露光光 I L の照度（露光量）との相関係数は、予め求められ、主制御装置 5 0 に併設された記憶装置としてのメモリ 5 1 内に記憶されている。

#### 【0 1 8 8】

また、レチクル R 上の照明領域 4 2 R を照明しそのレチクルのパターン面（図 1 における下面）で反射された反射光束は、コンデンサレンズ 3 2、リレー光学系を前と逆向きに通過し、ビームスプリッタ 2 6 で反射され、集光レンズ 4 8 を介して反射光モニタ 4 7 で受光される。また、Z チルトステージ 5 8 が投影光学

系 P L の下方にある場合には、レチクルのパターン面を透過した露光光 I L は、投影光学系 P L 及びウエハ W の表面（あるいは後述する基準マーク板 F M 表面）で反射され、その反射光束は、投影光学系 P L、レチクル R、コンデンサレンズ 3 2、リレー光学系を前と逆向きに順次通過し、ビームスプリッタ 2 6 で反射され、集光レンズ 4 8 を介して反射光モニタ 4 7 で受光される。また、ビームスプリッタ 2 6 とウエハ W との間に配置される各光学素子はその表面に反射防止膜が形成されているものの、その表面で露光光 I L がわずかに反射され、これら反射光も反射光モニタ 4 7 で受光される。この反射光モニタ 4 7 の光電変換信号が、不図示のピークホールド回路及び A/D 変換器を介して主制御装置 5 0 に供給される。反射光モニタ 4 7 は、本実施形態では、主としてウエハ W の反射率の測定等に用いられる。なお、この反射光モニタ 4 7 を、レチクル R の透過率の事前測定の際に用いても良い。

## 【 0 1 8 9 】

なお、フライアイレンズ系として、例えば特開平 1 - 2 3 5 2 8 9 号公報（対応米国特許第 5, 3 0 7, 2 0 7 号）、特開平 7 - 1 4 2 3.5 4 号（対応米国特許第 5, 5 3 4, 9 7 0 号）などに開示されるダブルフライアイレンズ系を採用し、ケーラー照明系を構成しても良い。

## 【 0 1 9 0 】

また、フライアイレンズ系 2 2 とともに、回折光学素子 (diffractive optical element) を用いても良い。かかる回折光学素子を用いる場合には、光源装置 1 6 と照明光学系 1 2 とを回折光学素子を介して接続するようにしても良い。

## 【 0 1 9 1 】

すなわち、バンドルファイバの各ファイバに対応して回折素子が形成される回折光学素子をビーム整形光学系 1 8 に設け、各ファイバから出力されるレーザービームを回折させて、フライアイレンズ系 2 2 の入射面上で重畳させるようにしても良い。本実施形態では、バンドルファイバの出力端を照明光学系の瞳面に配置しても良いが、この場合には第 1 の機能（間引き）によってその瞳面上での強度分布（即ち 2 次光源の形状や大きさなど）が変化することになり、レチクルパターンに最適な形状、大きさとは異なってしまふことがある。そこで、前述の

回折光学素子などを用いて照明光学系の瞳面、又はオプティカルインテグレータの入射面上で各ファイバからのレーザビームを重畳させるようにすることが望ましい。

【0192】

いずれにしても、本実施形態では、前述した光量制御装置 16C の第 1 の機能によりバンドルファイバ 173 の光を出力する部分の分布が変化した場合であっても、レチクル R のパターン面（物体面）上及びウエハ W の面（像面）上のいずれにおいても照度分布の均一性を十分に確保することができる。

【0193】

前記レチクルステージ RST 上にレチクル R が載置され、不図示のバキュームチャック等を介して吸着保持されている。レチクルステージ RST は、水平面（XY 平面）内で微小駆動可能であるとともに、レチクルステージ駆動部 49 によって走査方向（ここでは図 1 の紙面左右方向である Y 方向とする）に所定ストローク範囲で走査されるようになっている。この走査中のレチクルステージ RST の位置及び回転量は、レチクルステージ RST 上に固定された移動鏡 52R を介して外部のレーザ干渉計 54R によって計測され、このレーザ干渉計 54R の計測値が主制御装置 50 に供給されるようになっている。

【0194】

なお、レチクル R に用いる材質は、露光光 IL の波長によって使い分ける必要がある。すなわち、波長 193 nm の露光光を用いる場合には合成石英を用いることができるが、波長 157 nm の露光光を用いる場合は、ホタル石、フッ素がドープされた合成石英、あるいは水晶などで形成する必要がある。

【0195】

前記投影光学系 PL は、例えば両側テレセントリックな縮小系であり、共通の Z 軸方向の光軸を有する複数枚のレンズエレメント 70a、70b、……から構成されている。また、この投影光学系 PL としては、投影倍率  $\beta$  が例えば  $1/4$ 、 $1/5$ 、 $1/6$  などのものが使用されている。このため、前記の如くして、露光光 IL によりレチクル R 上の照明領域 42R が照明されると、そのレチクル R に形成されたパターンが投影光学系 PL によって投影倍率  $\beta$  で縮小された像が表

面にレジスト（感光剤）が塗布されたウエハW上のスリット状の露光領域42Wに投影され転写される。

## 【0196】

本実施形態では、上記のレンズエレメントのうち、複数のレンズエレメントがそれぞれ独立に移動可能となっている。例えば、レチクルステージRSTに最も近い一番上のレンズエレメント70aは、リング状の支持部材72により保持され、この支持部材72は、伸縮可能な駆動素子、例えば piezo 素子74a, 74b, 74c（紙面奥側の駆動素子74cは図示せず）によって、3点支持されるとともに鏡筒部76と連結されている。上記の駆動素子74a, 74b, 74cによって、レンズエレメント70aの周辺3点を独立に、投影光学系PLの光軸AX方向に移動させることができるようになっている。すなわち、レンズエレメント70aを駆動素子74a, 74b, 74cの変位量に応じて光軸AXに沿って平行移動させることができるとともに、光軸AXと垂直な平面に対して任意に傾斜させることもできる。そして、これらの駆動素子74a, 74b, 74cに与えられる電圧が、主制御装置50からの指令に基づいて結像特性補正コントローラ78によって制御され、これによって駆動素子74a, 74b, 74cの変位量が制御されるようになっている。なお、図1中、投影光学系PLの光軸AXとは鏡筒部76に固定されているレンズエレメント70bその他のレンズエレメント（図示省略）の光軸を指す。

## 【0197】

また、本実施形態では、予め実験によりレンズエレメント70aの上下量と倍率（又はディストーション）の変化量との関係を求めておき、これを主制御装置50内部のメモリに記憶しておき、補正時に主制御装置50が補正する倍率（又はディストーション）からレンズエレメント70aの上下量を計算し、結像特性補正コントローラ78に指示を与えて駆動素子74a, 74b, 74cを駆動することにより倍率（又はディストーション）補正を行うようになっている。なお、前記レンズエレメント70aの上下量と倍率等の変化量との関係は光学的な計算値を用いてもよく、この場合は前記レンズエレメント70aの上下量と倍率変化量との関係を求める実験の工程が省けることになる。

## 【0198】

前記の如く、レチクルRに最も近いレンズエレメント70aが移動可能となっているが、このエレメント70aは倍率、ディストーション特性に与える影響が他のレンズエレメントに比べて大きく制御しやすいものの1つを選択したものであって、同様の条件を満たすものであれば、このレンズエレメント70aに代えてどのレンズエレメントをレンズ間隔調整のために移動可能に構成しても良い。

---

## 【0199】

なお、レンズエレメント70a以外の少なくとも1つのレンズエレメントを移動して他の光学特性、例えば像面湾曲、非点収差、コマ収差、又は球面収差などを調整できるようになっている。この他、投影光学系PLの光軸方向中央部近傍の特定のレンズエレメント相互間に密封室を設け、この密封室内の気体の圧力を例えばベローズポンプ等の圧力調整機構により調整することにより、投影光学系PLの倍率を調整する結像特性補正機構を設けても良く、あるいは、例えば、投影光学系PLを構成する一部のレンズエレメントとして非球面状レンズを用い、これを回転させるようにしても良い。この場合には、いわゆるひし形ディストーションの補正が可能になる。あるいは、投影光学系PL内に平行平板を設け、これをチルトさせたり、回転させたりするような機構により結像特性補正機構を構成しても良い。

## 【0200】

なお、露光光ILとして波長193nmのレーザー光を用いる場合には、投影光学系PLを構成する各レンズエレメント（及び上記平行平板）としては合成石英やホタル石等を用いることができるが、波長157nmのレーザー光を用いる場合には、この投影光学系PLに使用されるレンズ等の材質は、全てホタル石が用いられる。

## 【0201】

また、本実施形態では、チャンバ11内の大気圧を測定する大気圧センサ77が設けられている。この大気圧センサ77の計測値は、主制御装置50に供給されるようになっており、主制御装置50では、この大気圧センサ77の計測値に基づいて、標準大気圧からの気圧の変動を算出するとともに、投影光学系PLの

結像特性の大気圧変動を算出する。そして、この大気圧変動分を考慮して結像特性補正コントローラ 7 8 に指示を与えて、投影光学系 P L の結像特性を補正する。

#### 【 0 2 0 2 】

なお、上記の発振波長の変更は、主制御装置 5 0 から指示に基づき、レーザ制御装置 1 6 B がビームモニタ機構 1 6 4 を構成するエタロン素子の温度を積極的に制御して、エタロン素子の透過率が最大となる共鳴波長（検出基準波長）が一致している設定波長（目標波長）を変更すると共に、この変更後の設定波長に D F B 半導体レーザ 1 6 0 A の発振波長が一致するように、D F B 半導体レーザ 1 6 0 A の温度をフィードバック制御することにより容易に達成される。

#### 【 0 2 0 3 】

なお、主制御装置 5 0 による結像特性の大気圧変動分、照射変動分等の演算方法等については、例えば特開平 9 - 2 1 3 6 1 9 号公報等に詳細に開示されており、公知であるから、ここでは詳細な説明は省略する。

#### 【 0 2 0 4 】

前記 X Y ステージ 1 4 は、ウエハステージ駆動部 5 6 によって走査方向である Y 方向及びこれに直交する X 方向（図 1 における紙面直交方向）に 2 次元駆動されるようになっている。この X Y ステージ 1 4 上に搭載された Z チルトステージ 5 8 上に不図示のウエハホルダ 6 1 を介してウエハ W が真空吸着等により保持されている。Z チルトステージ 5 8 は、例えば 3 つのアクチュエータ（ピエゾ素子又はボイスコイルモータなど）によってウエハ W の Z 方向の位置（フォーカス位置）を調整すると共に、X Y 平面（投影光学系 P L の像面）に対するウエハ W の傾斜角を調整する機能を有する。また、X Y ステージ 1 4 の位置は、Z チルトステージ 5 8 上に固定された移動鏡 5 2 W を介して外部のレーザ干渉計 5 4 W により計測され、このレーザ干渉計 5 4 W の計測値が主制御装置 5 0 に供給されるようになっている。

#### 【 0 2 0 5 】

ここで、移動鏡は、実際には、X 軸に垂直な反射面を有する X 移動鏡と Y 軸に垂直な反射面を有する Y 移動鏡とが存在し、これに対応してレーザ干渉計も X 軸



位置計測用、Y軸位置計測用、及び回転（ヨーイング量、ピッチング量、ローリング量を含む）計測用のものがそれぞれ設けられているが、図1では、これらが代表的に、移動鏡52W、レーザ干渉計54Wとして示されている。

## 【0206】

また、Zチルトステージ58上には、ウエハWの近傍に、ウエハWの露光面と同じ高さの受光面を有し、投影光学系PLを通過した露光光ILの光量を検出するための照射量モニタ59が設けられている。照射量モニタ59は、露光領域42Wより一回り大きなX方向に延びる平面視長方形のハウジングを有し、このハウジングの中央部に露光領域42Wとほぼ同じ形状のスリット状の開口が形成されている。この開口は、実際にはハウジングの天井面を形成する合成石英等から成る受光ガラスの上面に形成された遮光膜の一部が取り除かれて形成されている。前記開口の真下にレンズを介してSi系PIN型フォトダイオード等の受光素子を有する光センサが配置されている。

## 【0207】

照射量モニタ59は、露光領域42Wに照射される露光光ILの強度測定に用いられる。照射量モニタ59を構成する受光素子の受光量に応じた光量信号が主制御装置50に供給されるようになっている。

## 【0208】

なお、光センサは、必ずしもZチルトステージ58の内部に設ける必要はなく、Zチルトステージ58の外部に光センサを配置し、リレー光学系でリレーされた照明光束を光ファイバ等を介してその光センサに導くようにしても良いことは勿論である。

## 【0209】

Zチルトステージ58上には、後述するレチクルアライメント等を行う際に使用される基準マーク板FMが設けられている。この基準マーク板FMは、その表面がウエハWの表面とほぼ同一の高さとされている。この基準マーク板FMの表面には、レチクルアライメント用基準マーク、ベースライン計測用基準マーク等の基準マークが形成されている。

## 【0210】

また、図 1 では図面の錯綜を避ける観点から図示が省略されているが、この露光装置 1 0 は、実際にはレチクルアライメントを行うためのレチクルアライメント系を備えている。

#### 【 0 2 1 1 】

レチクル R のアライメントを行う場合には、まず主制御装置 5 0 によりレチクルステージ駆動部 4 9、ウエハステージ駆動部 5 6 を介してレチクルステージ R S T 及び X Y ステージ 1 4 が駆動され、矩形の露光領域 4 2 W 内に基準マーク板 F M 上のレチクルアライメント用基準マークが設定され、その基準マークにレチクル R 上のレチクルマーク像がほぼ重なるようにレチクル R と Z チルトステージ 5 8 との相対位置が設定される。この状態で、主制御装置 5 0 によりレチクルアライメント系を用いて両マークが撮像され、主制御装置 5 0 では、その撮像信号を処理して対応する基準マークに対するレチクルマークの投影像の X 方向、Y 方向の位置ずれ量を算出する。

#### 【 0 2 1 2 】

また、上記のレチクルのアライメントの結果得られた基準マークの投影像の検出信号（画像信号）に含まれるコントラスト情報に基づいてフォーカスオフセットやレベリングオフセット（投影光学系 P L の焦点位置、像面傾斜など）を求めることも可能である。

#### 【 0 2 1 3 】

また、本実施形態では、上記のレチクルアライメント時に、主制御装置 5 0 によって、投影光学系 P L の側面に設けられた不図示のウエハ側のオフアクシス・アライメントセンサのベースライン量の計測も行われる。すなわち、基準マーク板 F M 上には、レチクルアライメント用基準マークに対して所定の位置関係でベースライン計測用基準マークが形成されており、レチクルアライメント系を介してレチクルマークの位置ずれ量を計測する際に、そのウエハ側のアライメントセンサを介してベースライン計測用基準マークのそのアライメントセンサの検出中心に対する位置ずれ量を計測することで、アライメントセンサのベースライン量、すなわちレチクル投影位置とアライメントセンサとの相対位置関係が計測される。

## 【0 2 1 4】

更に、本実施形態の露光装置 1 0 では、図 1 に示されるように、主制御装置 5 0 によってオン・オフが制御される光源を有し、投影光学系 P L の結像面に向けて多数のピンホールまたはスリットの像を形成するための結像光束を、光軸 A X に対して斜め方向より照射する照射光学系 6 0 a と、それらの結像光束のウエハ W 表面での反射光束を受光する受光光学系 6 0 b とからなる斜入射光式の多点焦点位置検出系（フォーカスセンサ）が設けられている。主制御装置 5 0 では、受光光学系 6 0 b 内の図示しない平行平板の反射光束の光軸に対する傾きを制御することにより、投影光学系 P L のフォーカス変動に応じて焦点検出系（6 0 a、6 0 b）にオフセットを与えてそのキャリブレーションを行う。これにより、前述の露光領域 4 2 W 内で投影光学系 P L の像面とウエハ W の表面とがその焦点深度の範囲（幅）内で合致することになる。なお、本実施形態と同様の多点焦点位置検出系（フォーカスセンサ）の詳細な構成は、例えば特開平 6 - 2 8 3 4 0 3 号公報等の開示されている。

## 【0 2 1 5】

走査露光時等に、主制御装置 5 0 では、受光光学系 6 0 b からの焦点ずれ信号（デフォーカス信号）、例えば S カーブ信号に基づいて焦点ずれが零となるように Z チルトステージ 5 8 の Z 位置を不図示の駆動系を介して制御することにより、オートフォーカス（自動焦点合わせ）及びオートレベリングを実行する。

## 【0 2 1 6】

なお、受光光学系 6 0 b 内に平行平板を設けて焦点検出系（6 0 a、6 0 b）にオフセットを与えるようにしたのは、例えば、倍率補正のためにレンズエレメント 7 0 a を上下することによりフォーカスも変化し、また、投影光学系 P L が露光光 I L を吸収することにより結像特性が変化して結像面の位置が変動するので、かかる場合に焦点検出系にオフセットを与え、焦点検出系の合焦位置を投影光学系 P L の結像面の位置に一致させる必要があるためである。このため、本実施形態では、レンズエレメント 7 0 a の上下量とフォーカス変化量の関係も予め実験により求め、主制御装置 5 0 内部のメモリに記憶している。なお、レンズエレメント 7 0 a の上下量とフォーカス変化量の関係は計算値を用いても良い。ま

た、オートレベリングでは走査方向については行わず、その走査方向と直交する非走査方向のみに関して行うようにしても良い。

#### 【0217】

前記主制御装置50は、CPU（中央演算処理装置）、ROM（リード・オンリ・メモリ）、RAM（ランダム・アクセス・メモリ）等から成るいわゆるマイクロコンピュータ（又はワークステーション）を含んで構成され、これまでに説明した各種の制御を行う他、露光動作が的確に行われるように、例えばレチクルRとウエハWの同期走査、ウエハWのステッピング、露光タイミング等を制御する。また、本実施形態では、主制御装置50は、後述するように走査露光の際の露光量の制御を行ったり、投影光学系PLの結像特性の変動量を演算にて算出し、その算出結果に基づいて結像特性補正コントローラ78を介して投影光学系PLの結像特性を調整する等の他、装置全体を統括制御する。

#### 【0218】

具体的には、主制御装置50は、例えば走査露光時には、レチクルRがレチクルステージRSTを介して+Y方向（又は-Y方向）に速度 $V_R = V$ で走査されるのに同期して、XYステージ14を介してウエハWが露光領域42Wに対して-Y方向（又は+Y方向）に速度 $V_W = \beta \cdot V$ （ $\beta$ はレチクルRからウエハWに対する投影倍率）で走査されるように、レーザ干渉計54R、54Wの計測値に基づいてレチクルステージ駆動部49、ウエハステージ駆動部56をそれぞれ介してレチクルステージRST、XYステージ14の位置及び速度をそれぞれ制御する。また、ステッピングの際には、主制御装置50ではレーザ干渉計54Wの計測値に基づいてウエハステージ駆動部56を介してXYステージ14の位置を制御する。

#### 【0219】

次に、本実施形態の露光装置10において所定枚数（N枚）のウエハW上にレチクルパターンの露光を行う場合の露光シーケンスについて主制御装置50の制御動作を中心として説明する。

#### 【0220】

まず、前提条件について説明する。

① オペレータによりコンソール等の入出力装置 62 (図 1 参照) から入力されたショット配列、ショットサイズ、各ショットの露光順序その他の必要なデータに基づいて、予めショットマップデータ (各ショット領域の露光順序と走査方向とを定めたデータ) が作成され、メモリ 51 (図 1 参照) 内に格納されているものとする。

② また、インテグレータセンサ 46 の出力は、Z チルトステージ 58 上で像面 (即ち、ウエハの表面) と同じ高さに設置された不図示の基準照度計の出力に対して予め較正 (キャリブレーション) されているものとする。インテグレータセンサ 46 の較正とは、インテグレータセンサ 46 の出力を、像面上の露光量に変換するための変換係数 (或いは変換関数) を得ることである。この変換係数を用いると、インテグレータセンサ 46 の出力より間接的に像面上に与えられている露光量 (エネルギー) を計測できることになる。

③ また、上記キャリブレーションが完了したインテグレータセンサ 46 の出力に対して、ビームモニタ機構 164 内のエネルギーモニタ、光増幅部 161 内の光電変換素子 180、181 及び波長変換部 163 内の光電変換素子 182 等の出力もキャリブレーションされ、インテグレータセンサ 46 の出力に対する各センサ出力の相関係数も予め求められ、メモリ 51 内に格納されている。

④ さらに、上記キャリブレーションが完了したインテグレータセンサ 46 の出力に対して反射光モニタ 47 の出力がキャリブレーションされ、インテグレータセンサ 46 の出力と反射光モニタ 47 の出力との相関係数が予め求められてメモリ 51 内に格納されているものとする。

#### 【0221】

まず、オペレータによりコンソール等の入出力装置 62 (図 1 参照) から照明条件 (投影光学系の開口数  $N.A.$ 、2 次光源の形状 (開口絞り 24 の種類)、コヒーレンスファクタ  $\sigma$  やレチクルパターンの種類 (コンタクトホール、ラインアンドスペース等)、レチクルの種類 (位相差レチクル、ハーフトーンレチクル等)、及び最小線幅又は露光量許容誤差など) を含む露光条件が入力され、この入力に応じて、主制御装置 50 が、投影光学系 PL の不図示の開口絞りの設定、照明系開口絞り板 24 の開口の選択設定、レジスト感度に応じた目標積算露光量

(設定光量に対応する量である)の設定等を行う。このとき、同時に主制御装置 5 0 では、目標積算露光量を得るための光源装置 1 6 からの出力光量を設定光量にほぼ一致させるための、バンドルファイバ 1 7 3 の出力をオン、及びオフにすべきチャンネルの選択を行い、この選択指令を光量制御装置に与える。これにより、後述する走査露光の際にレーザ光源 1 6 0 A の発光とほぼ同時に、光量制御装置 1 6 C により、前述した第 1 の機能により選択指令に応じて各チャンネルのファイバ増幅器 1 7 1<sub>n</sub> のオン・オフが実行され、露光量の粗調整が実行されることとなる。

【 0 2 2 2 】

次に、主制御装置 5 0 では、不図示のレチクルローダを用いて露光対象のレチクル R をレチクルステージ R S T 上にロードする。

【 0 2 2 3 】

次いで、前述した如く、レチクルアライメント系を用いてレチクルアライメントを行うとともに、ベースライン計測を行う。

【 0 2 2 4 】

次に、主制御装置 5 0 では、不図示のウエハ搬送系にウエハ W の交換を指示する。これにより、ウエハ搬送系及び X Y ステージ 1 4 上の不図示のウエハ受け渡し機構によってウエハ交換 (ステージ上にウエハが無い場合は、単なるウエハロード) が行われ、次いでいわゆるサーチアライメント及びファインアライメント (E G A 等) の一連のアライメント工程の処理を行う。これらのウエハ交換、ウエハアライメントは、公知の露光装置と同様に行われるので、ここではこれ以上の詳細な説明は省略する。

【 0 2 2 5 】

次に、上記のアライメント結果及びショットマップデータに基づいて、ウエハ W 上の各ショット領域の露光のための走査開始位置にウエハ W を移動させる動作と、前述した走査露光動作とを繰り返し行って、ステップ・アンド・スキャン方式でウエハ W 上の複数のショット領域にレチクルパターンを転写する。この走査露光中に、主制御装置 5 0 では、露光条件及びレジスト感度に応じて決定された目標積算露光量をウエハ W に与えるため、インテグレータセンサ 4 6 の出力をモ

ニタしつつ光量制御装置 1 6 C に指令を与える。これにより、光量制御装置 1 6 C では、前述した第 1 の機能により露光量の粗調整を行うとともに、前述した第 2 の機能、第 3 の機能により、光源装置 1 6 からのレーザビーム（紫外パルス光）の周波数及びピークパワーを制御し、露光量の微調整を実行する。

【 0 2 2 6 】

また、主制御装置 5 0 では、照明系開口絞り板 2 4 を駆動装置 4 0 を介して制御し、更にステージ系の動作情報に同期して可動レチクルブラインド 3 0 B の開閉動作を制御する。

【 0 2 2 7 】

1 枚目のウエハ W に対する露光が終了すると、主制御装置 5 0 では、不図示のウエハ搬送系にウエハ W の交換を指示する。これにより、ウエハ搬送系及び X Y ステージ 1 4 上の不図示のウエハ受け渡し機構によってウエハ交換が行われ、以後上記と同様にしてその交換後のウエハに対してサーチアライメント、ファインアライメントを行う。また、この場合、主制御装置 5 0 により 1 枚目のウエハ W に対する露光開始からの投影光学系 P L の結像特性（フォーカスの変動を含む）の照射変動が、インテグレータセンサ 4 6 及び反射光モニタ 4 7 の計測値に基づいて求められ、この照射変動を補正するような指令値を結像特性補正コントローラ 7 8 に与えるとともに受光光学系 6 0 b にオフセットを与える。また、主制御装置 5 0 では、大気圧センサ 7 7 の計測値に基づいて、投影光学系 P L の結像特性の大気圧変動分も求めて、この照射変動を補正するような指令値を結像特性補正コントローラ 7 8 に与えるとともに受光光学系 6 0 b にオフセットを与える。

【 0 2 2 8 】

そして、上記と同様に、このウエハ W 上の複数のショット領域にステップ・アンド・スキャン方式でレチクルパターンを転写する。

【 0 2 2 9 】

この場合、前述した露光量（光量）の粗調整を、実露光前にテスト発光を行い、露光量設定値に対し、1 % 以下の精度で制御を確実に行うようにしても良い。

【 0 2 3 0 】

本実施形態の露光量の粗調整のダイナミックレンジは、 $1 \sim 1 / 128$  の範囲

内で設定可能であるが、通常要求されるダイナミックレンジは、典型的には  $1 - 1 / 7$  程度であるため、光出力をオンにすべきチャネル数（光ファイバ数）を  $128 \sim 18$  の間で制御することによって行えば良い。このように、本実施形態では、各チャネルの光出力の個別オン・オフによる露光量制御により、ウエハ毎のレジスト感度等の違いにあわせた露光量の粗調整を正確に行うことができる。

#### 【0231】

従って、本実施形態では、従来のエキシマレーザ露光装置に用いられていたNDフィルタ等のエネルギー粗調器が不要となる。

#### 【0232】

また、上述した光量制御装置 16C による、第2、第3の機能による光量制御は、制御速度が速く、制御精度が高いという特徴を持つため、以下の現状の露光装置に要求されている制御要請を確実に満たすことが可能である。

#### 【0233】

すなわち、同一ウエハ内における、例えばレジストの膜厚のばらつきに起因して生じる、ショット領域（チップ毎）のプロセスばらつきを補正する露光量制御のための要請である、ダイナミックレンジが設定露光量の  $\pm 10\%$  程度、ショット間ステッピング時間である  $100\text{ms}$  程度の時間内に設定値に制御すること、制御精度として設定露光量の  $\pm 1\%$  程度、1ショット領域の線幅均一性を実現するための露光制御のための要請である、制御精度として典型的には1ショットの露光時間である  $20\text{msec}$  の時間内に設定露光量の  $\pm 0.2\%$  に設定すること、制御速度  $1\text{ms}$  程度、の全てを満たす。

#### 【0234】

従って、露光量制御のためには、光量制御装置 16C では、第2、第3の機能による光量制御の少なくとも一方を行えば足りる。

#### 【0235】

また、本実施形態の露光装置 10 のようなレーザ光源（パルス光源）を有する走査型露光装置では、ウエハWの走査速度（スキャン速度）を  $V_w$ 、ウエハW上のスリット状の露光領域  $42W$  の走査方向の幅（スリット幅）を  $D$ 、レーザ光源のパルスの繰り返し周波数を  $F$  とすると、パルス発光間にウエハWが移動する間



隔は  $V_W/F$  であるため、ウエハ上の 1 点あたりに照射すべき露光光  $I_L$  のパルス数（露光パルス数） $N$  は次式（3）で表される。

【0236】

$$N = D / (V_W / F) \quad \dots\dots (3)$$

【0237】

パルスエネルギーを  $P$  とすると、単位時間にウエハ上の 1 点あたりに与えられるべきエネルギーは、次式（4）で表される。

【0238】

$$E = NP = ND / (V_W / F) \quad \dots\dots (4)$$

【0239】

従って、走査型露光装置では、スリット幅  $D$ 、スキャン速度  $V_W$ 、レーザ光源のパルスの繰り返し周波数  $F$ 、パルスエネルギー  $P$  のいずれかを制御することにより、露光量（積算露光量）の制御が可能である。応答速度の問題から走査露光中にスリット幅  $D$  を調整することには難点があるので、スキャン速度  $V_W$ 、レーザ光源のパルスの繰り返し周波数  $F$ 、パルスエネルギー  $P$  のいずれかを制御すれば良い。

【0240】

従って、本実施形態の露光装置 10 においても、光量制御装置 16C の第 2、第 3 の機能による光量制御のいずれかと、スキャン速度とを組み合わせ、露光量を制御するようにしても、勿論良い。

【0241】

例えば、ウエハ  $W$  上に転写すべきレチクルパターンに応じてウエハ  $W$  の露光条件を変更する、例えば照明光学系の瞳面上での照明光の強度分布（即ち 2 次光源の形状や大きさ）を変化させたり、あるいは投影光学系  $PL$  のほぼ瞳面上でその光軸を中心とする円形領域を遮光する光学フィルタを挿脱する。この露光条件の変更によってウエハ  $W$  上での照度に変化するが、このことはレチクルパターンの変更によっても生じる。これは、パターンの遮光部（又は透過部）の占有面積の違いによるものである。そこで、露光条件及びレチクルパターンの少なくとも一方の変更によって照度に変化するときは、ウエハ（レジスト）に適正な露光量が

与えられるように、前述した周波数とピークパワーとの少なくとも一方を制御することが望ましい。このとき、周波数及びピークパワーの少なくとも一方に加えてレチクル及びウエハの走査速度を調整するようにしても良い。

#### 【0242】

以上詳細に説明したように、本実施形態に係る光源装置 16 によると、光発生部 160 で発生した単一波長のレーザ光が遅延部 167 を介してその出力段に並列に設けられた総計 128 の光ファイバ（光経路  $172_n$ ）のそれぞれに向かって進むが、光量制御装置 16C では各光経路  $172_n$  からの光出力を個別にオン・オフすることにより、ファイバ群（光経路  $172_n$  の全体）から出力される光の光量を制御する。このように本実施形態では、各光経路  $172_n$  の光出力を個別にオン・オフするという簡単な手法により光経路  $172_n$  の全体から出力される光の光量制御を実現することができる。

#### 【0243】

また、この場合、光経路の数に比例した 128 段階の光量制御が可能となるので、広いダイナミックレンジを容易に実現することができる。また、各光経路の諸性能がほぼ同じであるため、光経路のそれぞれからの同一光量の光を出力させることができる。この結果、光経路の数に応じた 128 段階の光量制御をリニアリティ良く実行することができる。この場合、1% 刻み以下の精度で光量を制御することができる。

#### 【0244】

また、これにより前述の如く、ND フィルタ等のエネルギー粗調器は不要となるので、該フィルタの耐久性、透過率の計時変化等に起因する光量制御性能の劣化等の諸問題も改善できる。

#### 【0245】

また、各光経路を構成するファイバ増幅器  $171_n$  は、それぞれの出力端部が束ねられてバンドルファイバ 173 が構成されており、該バンドルファイバ 173 全体の直径が 2 mm 以下となっている。そのため、出力段に配置される四分の一波長板 162、及び波長変換部 163 を構成する非線形光学結晶等の光学素子として小型の光学素子を用いることができる。

## 【 0 2 4 6 】

また、各光経路  $172_n$  の一部には、ファイバ増幅器  $168_n$ 、 $171_n$  が設けられ、光量制御装置  $16C$  は、各光経路  $172_n$  の光出力のオン・オフを最終段のファイバ増幅器  $171_n$  の励起用半導体レーザ  $174$  のからの励起光の強度の切り換えにより行うようになっている。このため、ファイバ増幅器  $168_n$ 、 $171_n$  により光経路  $172_n$  に入射した光を増幅できるとともに、光出力をオフすることとされた光経路  $172_n$  に設けられたファイバ増幅器  $171_n$  に対する励起光の強度レベルが低く（零を含む）設定されるので、その分省エネが可能である。また、ファイバ増幅器の励起用半導体レーザ  $174$  からの励起光の強度の切り換えにより光出力のオン・オフを行うので、シャッタ等を用いる場合に比べて短時間で光出力のオン・オフが可能である。

## 【 0 2 4 7 】

また、光経路  $172_n$  からの光出力のオン・オフを最終段のファイバ増幅器  $171_n$  の励起用半導体レーザ  $174$  からの励起光の強度の切り換えにより行うことから、最終段以外のファイバ増幅器の励起用光源からの励起光の強度を切り換える場合に問題となる A S E の悪影響を回避することができる。また、ファイバ増幅器  $171_n$  は最も大きな励起光の強度を必要とするので、ファイバ増幅器  $171_n$  からの光出力をオフしたときの省エネの効果が一層大きくなる。

## 【 0 2 4 8 】

また、この最終段のファイバ増幅器  $171_n$  は、ファイバ増幅器  $168_n$  に比べてモードフィールド径が大きいものが用いられているので、光ファイバ中での非線形効果による増幅光のスペクトル幅の増加を避けることができる。

## 【 0 2 4 9 】

また、メモリ  $51$  内に光経路  $172_n$  からの光出力のオン・オフ状況に対応する第  $1$  の出力強度マップが予め記憶され、光量制御装置  $16C$  は、第  $1$  の出力強度マップと所定の設定光量とに基づいて各光経路  $172_n$  からの光出力を個別にオン・オフするようになっている。このため、各光経路  $172_n$  の出力にばらつきがあっても光経路全体の光出力を設定光量にほぼ一致させることができるとともに、諸性能の異なる構成部材を用いて光経路を構成することも可能である。す

なわち、諸性能（ファイバ径等を含む）の異なる光ファイバ等を用いることが可能となる。

【0250】

また、第1の出力強度マップは、予め実際に測定された各光経路の出力のばらつきに基づいて作成されているので、光経路全体の光出力を設定光量に確実に一致させることができる。

【0251】

また、本実施形態の光源装置16では、各光経路172<sub>n</sub>から出力される光の波長を変換する波長変換部163を備えているが、波長変換部163の出力は、光出力がオンである光経路数（チャンネル数）に比例する。このため、光経路の諸性能がほぼ同じである場合には、光経路172<sub>n</sub>のそれぞれからの同一光量の光を出力させることができる結果、ニアリティ良く光量を制御することができる。

【0252】

また、第1の出力強度マップは、予め測定された各光経路出力に対応する波長変換効率のばらつきに起因する出力のばらつきをも考慮して作成されているので、各光経路からの光出力に対する波長変換効率にばらつきがあっても、出力光の光量を設定光量に制御することができる。

【0253】

また、本実施形態に係る光源装置16は、複数の光経路それぞれからの光出力を個別に遅延させて、光出力を時間的にずらして行わせる遅延部167を備えているので、各光経路から出力される光が時間的に重なることがなくなるので、結果的に該光源装置16からの出力光は、極めて狭帯域化された単一波長の光でありながら、お互いに時間的に重なり合うことがなく、各チャンネル出力間の空間的コヒーレンスを低減することができる。

【0254】

また、本実施形態に係る光源装置16によると、光量制御装置16CがEOM160Cから出力されるパルス光の周波数を制御することにより、光増幅部161を構成するファイバ増幅器からの出力光の光量を設定光量（目標光量）に一致させることができる。このパルス光の周波数（単位時間当たりのパルス数）制御

による光量調整では、前述した光経路からの光出力の個別オン・オフに比べて、より高速にかつより細やかな光量調整を行うことが可能となり、設定光量が所定範囲内にあれば如何なる値に設定されても光量をほぼ一致させることができる。また、光出力と制御量とのリニアリティも良い。

#### 【0255】

また、光増幅部 161 に入力するパルス光の周波数に応じた光増幅部 161 の出力強度に基づく第 2 の出力強度マップがメモリ 51 内に記憶され、光量制御装置 16C は、第 2 の出力強度マップと所定の設定光量とに基づいて EOM 160C から出力されるパルス光の周波数を制御する。このため、光増幅部 161 を構成するファイバ増幅器の利得の入力光強度依存性に起因する光増幅部 161 からの出力パルスのピークパワー変化の影響を受けることのない、高精度な光量制御が可能となる。

#### 【0256】

また、本実施形態に係る光源装置 16 によると、光量制御装置 16C が EOM 160C から出力されるパルス光のピークパワーを制御することにより、光増幅部 161 を構成するファイバ増幅器からの出力光の光量を設定光量（目標光量）に一致させることができる。このパルス光のピークパワー制御による光量調整では、前述した光経路からの光出力の個別オン・オフに比べて、より高速にかつより細やかな光量調整を行うことが可能となり、設定光量が所定範囲内にあれば如何なる値に設定されても光量をほぼ一致させることができる。

#### 【0257】

また、光増幅部 161 に入力するパルス光の強度に応じた光増幅部 161 の出力強度に基づく第 3 の出力強度マップがメモリ 51 に記憶され、光量制御装置 16C は、第 3 の出力強度マップと所定の設定光量とに基づいて EOM 160C から出力されるパルス光のピークパワーを制御するので、光増幅部 161 を構成するファイバ増幅器の利得の入力光強度依存性に起因する光増幅部 161 からの出力パルスのピークパワー変化の影響を受けることのない、高精度な光量制御が可能となる。

#### 【0258】

また、本実施形態の光量制御装置 16C は、前述の如く、光経路からの光出力の個別オン・オフによる光量制御機能（第 1 の機能）と、EOM 160C から出力されるパルス光の周波数制御による光量制御機能（第 2 の機能）と、EOM 160C から出力されるパルス光のピークパワー制御による光量制御機能（第 3 の機能）とを有しているので、第 1 の機能と、第 2 の機能及び第 3 の機能の少なくとも一方とにより、光経路 172<sub>n</sub> の光出力の個別オン・オフによる段階的な光量制御に加えて、各段階間の光量の微調整が EOM 160C から出力されるパルス光の周波数及びピークパワーの少なくとも一方の制御により可能になるので、結果的に光量の連続制御が可能となり、所定範囲内であれば設定光量が如何なる値に設定されても、出力光の光量をその設定光量に一致させることが可能になっている。

## 【0259】

また、光量制御装置 16C では、第 2 の機能と第 3 の機能とにより、EOM 160C から出力されるパルス光の周波数制御に加えてピークパワーを更に制御することができるので、パルス光のピークパワーに変動があるような場合であっても、精度の良い光量制御が可能となる。

## 【0260】

しかしながら、本発明がこれに限定されるものではなく、本発明に係る光源装置を構成する光量制御装置は、上記第 1 ～第 3 の機能の少なくとも一つのみを有していても良い。

## 【0261】

また、本実施形態に係る露光装置 10 によると、照明光学系 12 により光源装置 16 の波長変換部 163 から出力される紫外光（波長 193 nm 又は 157 nm）を露光用照明光としてレチクル R が照明され、該レチクル R に形成されたパターンがウエハ W 上に転写される。この場合、光源装置 16 により、レチクル R に照射される紫外光の光量制御を必要な要請に応じて行うことができるので、結果的に要求される露光量制御を実現することができる。

## 【0262】

また、露光装置 10 によると、光発生部 160 では、光源 160A で発生した

単一波長の光を E O M 1 6 0 C によりパルス光に変換することによりパルス光を発生し、そのパルス光がファイバ増幅器を含む光増幅部 1 6 1 によって増幅される。そして、主制御装置 5 0 により、その増幅されたパルス光をレチクル R に照射して、該レチクルを介してウエハ W を露光する際に、その露光対象領域のウエハ上の位置、すなわち各ショット領域のウエハ上の位置又は各ショット領域内のスリット状照明領域で照明される領域の位置に応じて E O M 1 6 0 C を介してパルス光の周波数及びピークパワーの少なくとも一方が光量制御装置 1 6 C を介して制御され、これによりレチクル R に照射される光量、ひいてはウエハの露光量が高精度に制御される。従って、ウエハ上の露光対象領域の位置によらず、常に適切な露光量制御が可能となり、精度良くレチクル R のパターンをウエハ W 上に転写することが可能になる。すなわち、ウエハ上の各ショット領域毎のプロセスばらつきの補正や各ショット領域内の線幅均一性の向上が可能になる。

## 【 0 2 6 3 】

また、本実施形態に係る露光装置によると、主制御装置 5 0 により、前記の如く、増幅されたパルス光をレチクル R に照射して、該レチクル R を介してウエハ W を露光する際に、各光経路 1 7 2<sub>n</sub> からの光出力を個別にオン・オフすることにより光増幅部 1 6 1 から出力されるパルス光の光量が光量制御装置 1 6 C を介して制御され、これによりレチクル R に照射される光量、ひいてはウエハの露光量が広い範囲に渡って段階的に制御される。従って、複数枚のウエハを繰り返し露光する際のウエハ毎のレジスト感度等の違いに合わせた露光量制御が可能になる。従って、レジスト感度等に影響を受けることなく、ウエハ上にレチクルパターンを要求される精度で転写することが可能になる。

## 【 0 2 6 4 】

なお、上記実施形態では、各光経路（各チャネル）からの光出力をオン・オフする際に、ファイバ増幅器の励起光の強度を切り換えることにより行う場合について説明したが、本発明がこれに限定されるものではなく、例えば、各光経路に対する入射光を遮光する機械的又は電氣的なシャッタ、あるいは各光経路からの光の出射を阻止する機械的又は電氣的なシャッタを設ける等種々考えられる。

## 【 0 2 6 5 】

また、上記実施形態では、光増幅部 1 6 1 が 1 2 8 チャンネルの光経路を有する場合について説明したが、光増幅部は 1 チャンネルであっても良く、かかる場合であっても、前述した E O M 等の光変調器から出力されるパルス光の周波数制御、ピークパワー制御による光量、露光量の制御は好適に適用できる。

## 【 0 2 6 6 】

なお、上記実施形態では、バンドルファイバを形成するファイバの本数を 1 2 8 本としたが、その本数は任意でよく、本発明に係る光源装置が適用される製品、例えば露光装置で要求される仕様（ウエハ上での照度）、及び光学性能、即ち照明光学系や投影光学系の透過率、波長変換部の変換効率、及び各ファイバの出力などに応じてその本数を決定すればよい。さらに上記実施形態では、紫外光の波長を、A r F エキシマレーザ又は F<sub>2</sub> レーザの波長とほぼ同一に設定するものとしたが、その設定波長は任意で良く、この設定すべき波長に応じて、レーザ光源 1 6 0 A の発振波長や波長変換部の構成及び高調波の倍率などを決定すれば良い。なお、設定波長は、一例として、ウエハ上に転写すべきパターンのデザインルール（線幅、ピッチなど）に応じて決定するようにしても良く、更にはその決定に際して前述の露光条件やレチクルの種類（位相シフト型か否か）などを考慮しても良い。

## 【 0 2 6 7 】

なお、上記実施形態では、レーザ光源 1 6 0 A の発振波長の制御のため、レーザ光源 1 6 0 A の直後でそのレーザ光をビームモニタ機構 1 6 4 によりモニタするものとしたが、これに限らず、例えば図 5 中に点線で示されるように、波長変換部 1 6 3 内（あるいは波長変換部 1 6 3 の後方）で光束を分岐して、これをビームモニタ機構 1 6 4 と同様のビームモニタ機構 1 8 3 でモニタするようにしても良い。そして、このビームモニタ機構 1 8 3 によるモニタ結果に基づいて、波長変換が正確に行われているか否かを検出し、この検出結果に基づいて主制御装置 5 0 がレーザ制御装置 1 6 B をフィードバック制御するようにしても良い。勿論、両方のビームモニタ機構のモニタ結果を用いてレーザ光源 1 6 0 A の発振波長制御を行っても良い。

## 【 0 2 6 8 】



また、上記実施形態中では特に説明をしなかったが、本実施形態のように、193nm以下の露光波長により露光を行う装置の場合には、光束通過部分にはケミカルフィルタを通過したクリーンエアーや、ドライエアー、N<sub>2</sub>ガス、若しくはヘリウム、アルゴン、クリプトン等の不活性ガスを充填させあるいはフローさせたり、該光束通過部分を真空にする等の処置が必要となる。

## 【0269】

上記実施形態の露光装置は、本願の特許請求の範囲に挙げられた各構成要素を含む各種サブシステムを、所定の機械的精度、電気的精度、光学的精度を保つように、組み立てることで製造される。これら各種精度を確保するために、この組み立ての前後には、各種光学系については光学的精度を達成するための調整、各種機械系については機械的精度を達成するための調整、各種電気系については電気的精度を達成するための調整が行われる。各種サブシステムから露光装置への組み立て工程は、各種サブシステム相互の、機械的接続、電気回路の配線接続、気圧回路の配管接続等が含まれる。この各種サブシステムから露光装置への組み立て工程の前に、各サブシステム個々の組み立て工程があることは言うまでもない。各種サブシステムの露光装置への組み立て工程が終了したら、総合調整が行われ、露光装置全体としての各種精度が確保される。なお、露光装置の製造は温度およびクリーン度等が管理されたクリーンルームで行うことが望ましい。

## 【0270】

また、上記実施形態では、本発明に係る光源装置がステップ・アンド・スキャン方式の走査型露光装置に適用された場合について説明したが、露光装置以外の装置、例えば、ウエハ上に形成された回路パターンの一部（ヒューズなど）を切断するために用いられるレーザーリペア装置などにも本発明に係る光源装置を適用することができる。また、本発明に係る光源装置は可視光または赤外光を用いる検査装置などにも適用することができる。そしてこの場合には前述の波長変換部を光源装置に組み込む必要がない。すなわち、本発明は紫外レーザー装置だけでなく、可視域または赤外域の基本波を発生する、波長変換部がないレーザー装置に対しても有効なものである。また、本発明は、ステップ・アンド・スキャン方式の走査型露光装置に限らず、静止露光型、例えばステップ・アンド・リピート方式

の露光装置（ステッパなど）にも好適に適用できるものである。更にはステップ・アンド・スティッチ方式の露光装置、ミラープロジェクション・アライナーなどにも適用できる。

#### 【0271】

なお、上記実施形態で示した投影光学系や、照明光学系はほんの一例であって、本発明がこれに限定されないことは勿論である。例えば、投影光学系として屈折光学系に限らず、反射光学素子のみからなる反射系、又は反射光学素子と屈折光学素子とを有する反射屈折系（カタディオプトリック系）を採用しても良い。波長 200 nm 程度以下の真空紫外光（VUV 光）を用いる露光装置では、投影光学系として反射屈折系を用いることも考えられる。この反射屈折型の投影光学系としては、例えば特開平 8-171054 号公報及び特開平 10-20195 号公報などに開示される、反射光学素子としてビームスプリッタと凹面鏡とを有する反射屈折系、又は特開平 8-334695 号公報及び特開平 10-3039 号公報などに開示される、反射光学素子としてビームスプリッタを用いずに凹面鏡などを有する反射屈折系を用いることができる。

#### 【0272】

この他、米国特許第 5, 488, 229 号、及び特開平 10-104513 号公報に開示される、複数の屈折光学素子と 2 枚のミラー（凹面鏡である主鏡と、屈折素子又は平行平板の入射面と反対側に反射面が形成される裏面鏡である副鏡）とを同一軸上に配置し、その複数の屈折光学素子によって形成されるレチクルパターンの中間像を、主鏡と副鏡とによってウエハ上に再結像させる反射屈折系を用いても良い。この反射屈折系では、複数の屈折光学素子に続けて主鏡と副鏡とが配置され、照明光が主鏡の一部を通して副鏡、主鏡の順に反射され、さらに副鏡の一部を通してウエハ上に達することになる。

#### 【0273】

また、上記実施形態では、オプティカルインテグレータ（ホモジナイザ）としてフライアイレンズ系を用いるものとしたが、その代わりにロッド・インテグレータを用いるようにしてもよい。ロッド・インテグレータを用いる照明光学系では、ロッド・インテグレータはその射出面がレチクル R のパターン面とほぼ共役

になるように配置されるので、例えばロッド・インテグレータの射出面に近接して前述の固定レチクルブラインド30Aや可動レチクルブラインド30Bを配置しても良い。

【0274】

勿論、半導体素子の製造に用いられる露光装置だけでなく、液晶表示素子などを含むディスプレイの製造に用いられる、デバイスパターンをガラスプレート上に転写する露光装置、薄膜磁気ヘッドの製造に用いられる、デバイスパターンをセラミックウエハ上に転写する露光装置、及び撮像素子（CCDなど）の製造に用いられる露光装置などにも本発明を適用することができる。

【0275】

《デバイス製造方法》

【0276】

次に、上述した露光装置をリソグラフィ工程で使したデバイスの製造方法の実施形態について説明する。

【0277】

図7には、デバイス（ICやLSI等の半導体チップ、液晶パネル、CCD、薄膜磁気ヘッド、マイクロマシン等）の製造例のフローチャートが示されている。図7に示されるように、まず、ステップ201（設計ステップ）において、デバイスの機能・性能設計（例えば、半導体デバイスの回路設計等）を行い、その機能を実現するためのパターン設計を行う。引き続き、ステップ202（マスク製作ステップ）において、設計した回路パターンを形成したマスクを製作する。一方、ステップ203（ウエハ製造ステップ）において、シリコン等の材料を用いてウエハを製造する。

【0278】

次に、ステップ204（ウエハ処理ステップ）において、ステップ201～ステップ203で用意したマスクとウエハを使用して、後述するように、リソグラフィ技術等によってウエハ上に実際の回路等を形成する。次いで、ステップ205（デバイス組立ステップ）において、ステップ204で処理されたウエハを用いてデバイス組立を行う。このステップ205には、ダイシング工程、ボンディ

ング工程、及びパッケージング工程（チップ封入）等の工程が必要に応じて含まれる。

【 0 2 7 9 】

最後に、ステップ 2 0 6（検査ステップ）において、ステップ 2 0 5 で作製されたデバイスの動作確認テスト、耐久性テスト等の検査を行う。こうした工程を経た後にデバイスが完成し、これが出荷される。

【 0 2 8 0 】

図 8 には、半導体デバイスの場合における、上記ステップ 2 0 4 の詳細なフロー例が示されている。図 8 において、ステップ 2 1 1（酸化ステップ）においてはウエハの表面を酸化させる。ステップ 2 1 2（CVD ステップ）においてはウエハ表面に絶縁膜を形成する。ステップ 2 1 3（電極形成ステップ）においてはウエハ上に電極を蒸着によって形成する。ステップ 2 1 4（イオン打込みステップ）においてはウエハにイオンを打ち込む。以上のステップ 2 1 1～ステップ 2 1 4 それぞれは、ウエハ処理の各段階の前処理工程を構成しており、各段階において必要な処理に応じて選択されて実行される。

【 0 2 8 1 】

ウエハプロセスの各段階において、上述の前処理工程が終了すると、以下のようにして後処理工程が実行される。この後処理工程では、まず、ステップ 2 1 5（レジスト形成ステップ）において、ウエハに感光剤を塗布する。引き続き、ステップ 2 1 6（露光ステップ）において、上で説明した露光装置 1 0 を用いてマスクの回路パターンをウエハに転写する。次に、ステップ 2 1 7（現像ステップ）においては露光されたウエハを現像し、ステップ 2 1 8（エッチングステップ）において、レジストが残存している部分以外の部分の露出部材をエッチングにより取り去る。そして、ステップ 2 1 9（レジスト除去ステップ）において、エッチングが済んで不要となったレジストを取り除く。

【 0 2 8 2 】

これらの前処理工程と後処理工程とを繰り返し行うことによって、ウエハ上に多重に回路パターンが形成される。

【 0 2 8 3 】

以上説明した本実施形態のデバイス製造方法によると、露光工程（ステップ 216）において上記実施形態の露光装置 10 を用いて露光が行われるので、露光精度の向上により、高集積度のデバイスを歩留まり良く生産することができる。

【0284】

【発明の効果】

以上説明したように、請求項 1～27 に記載の各発明によれば、制御に必要な要請に応じた光量制御を行うことができる光源装置を提供することができる。

【0285】

また、請求項 28～33 に記載の各発明によれば、要求される露光量制御を容易に実現することができる露光装置を提供することができる。

【0286】

また、請求項 34～36 に記載の各発明によれば、要求される露光量制御を容易に実現することができる露光方法を提供することができる。

【0287】

また、請求項 37 及び 38 に記載の各発明によれば、高集積度のマイクロデバイスの生産性を向上することができるデバイス製造方法を提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【図 1】

本発明の一実施形態に係る露光装置の構成を概略的に示す図である。

【図 2】

図 1 の光源装置の内部構成を主制御装置とともに示すブロック図である。

【図 3】

図 2 の光増幅部の構成を概略的に示す図である。

【図 4】

光増幅部を構成する最終段のファイバ増幅器の出力端部が束ねられて形成されたバンドルファイバの断面を示す図である。

【図 5】

図 2 の光増幅部を構成するファイバ増幅器及びその周辺部を、波長変換部の一

部とともに概略的に示す図である。

【図 6】

図 6 (A) は、バンドルファイバ 1 7 3 の出力端から射出される波長 1. 5 4 4  $\mu$  m の基本波を、非線形光学結晶を用いて 8 倍波（高調波）に波長変換して 1 9 3 n m の紫外光を発生する波長変換部の構成例を示す図、図 6 (B) は、バンドルファイバ 1 7 3 の出力端から射出される波長 1. 5 7  $\mu$  m の基本波を非線形光学結晶を用いて 1 0 倍波に波長変換して 1 5 7 n m の紫外光を発生する波長変換部の構成例を示す図である。

【図 7】

本発明の係るデバイス製造方法の実施形態を説明するためのフローチャートである。

【図 8】

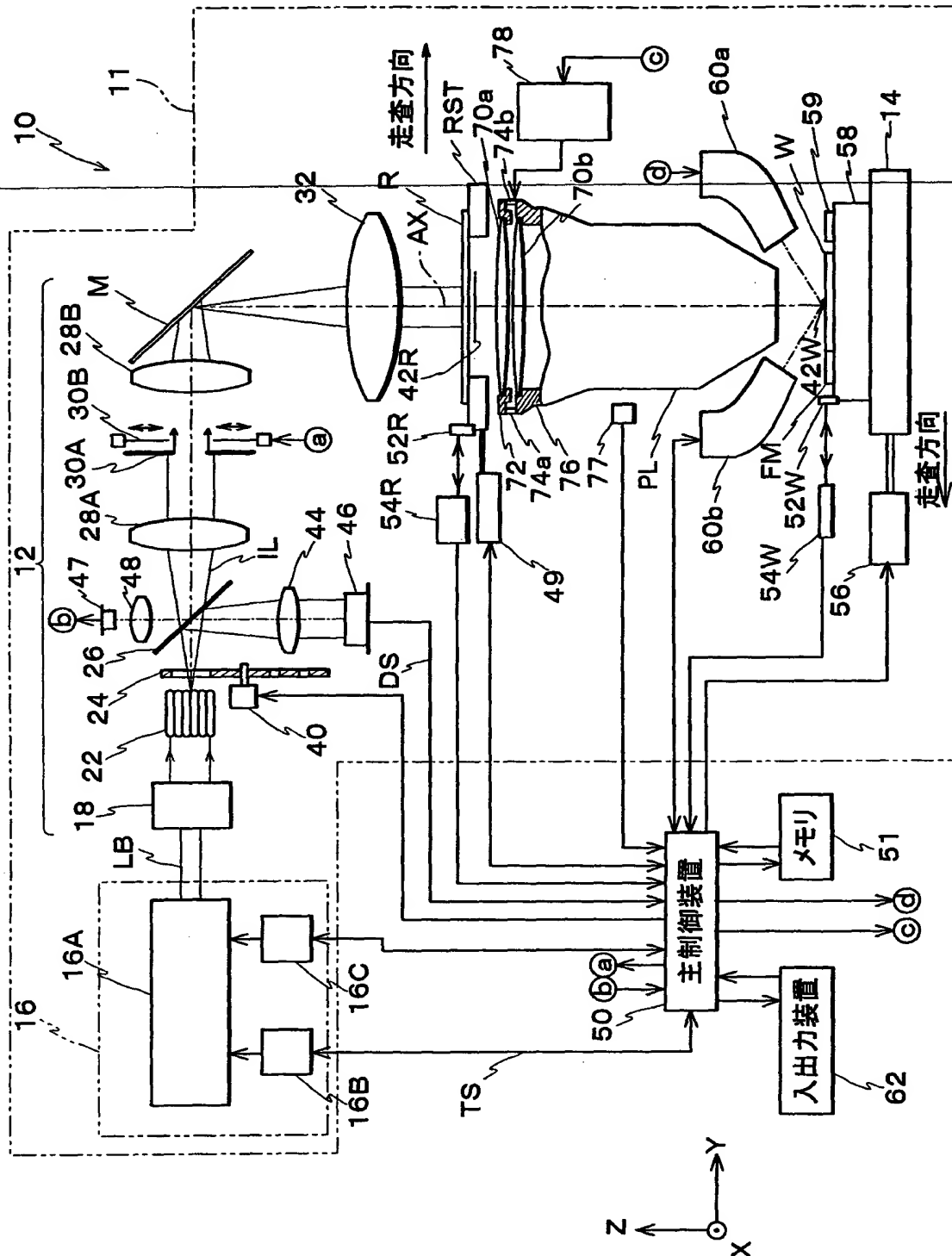
図 7 のステップ 2 0 4 における処理のを示すフローチャートである。

【符号の説明】

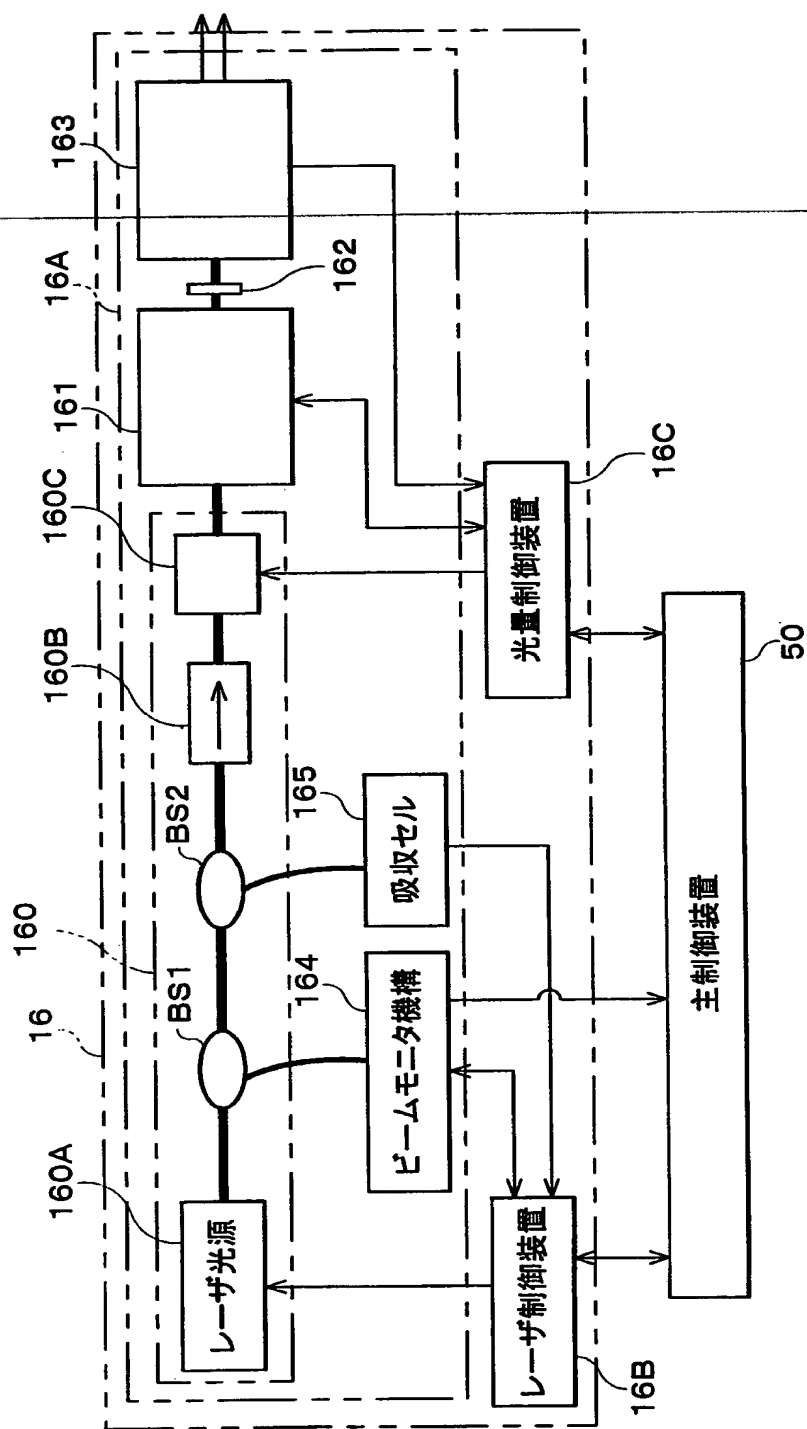
1 0 …露光装置、1 2 …照明光学系、1 6 …光源装置、1 6 C …光量制御装置、2 2 …フライアイレンズ系（オプティカルインテグレータ）、5 0 …主制御装置（制御装置）、5 1 …メモリ（記憶装置）、1 6 0 …光発生部、1 6 0 A …D F B 半導体レーザ（光源）、1 6 0 C …E O M（光変調器）、1 6 1 …光増幅部、1 6 3 …波長変換部、1 6 7 …遅延部、1 6 8<sub>n</sub> …ファイバ増幅器、1 7 1<sub>n</sub> …ファイバ増幅器、1 7 2<sub>n</sub> …光経路、1 7 3 …バンドルファイバ（ファイバ群）、1 7 4 …半導体レーザ（励起用光源）、1 7 8 …半導体レーザ（励起用光源）、R …レチクル（マスク）、W …ウエハ（基板）。

【書類名】 図面

【図 1】

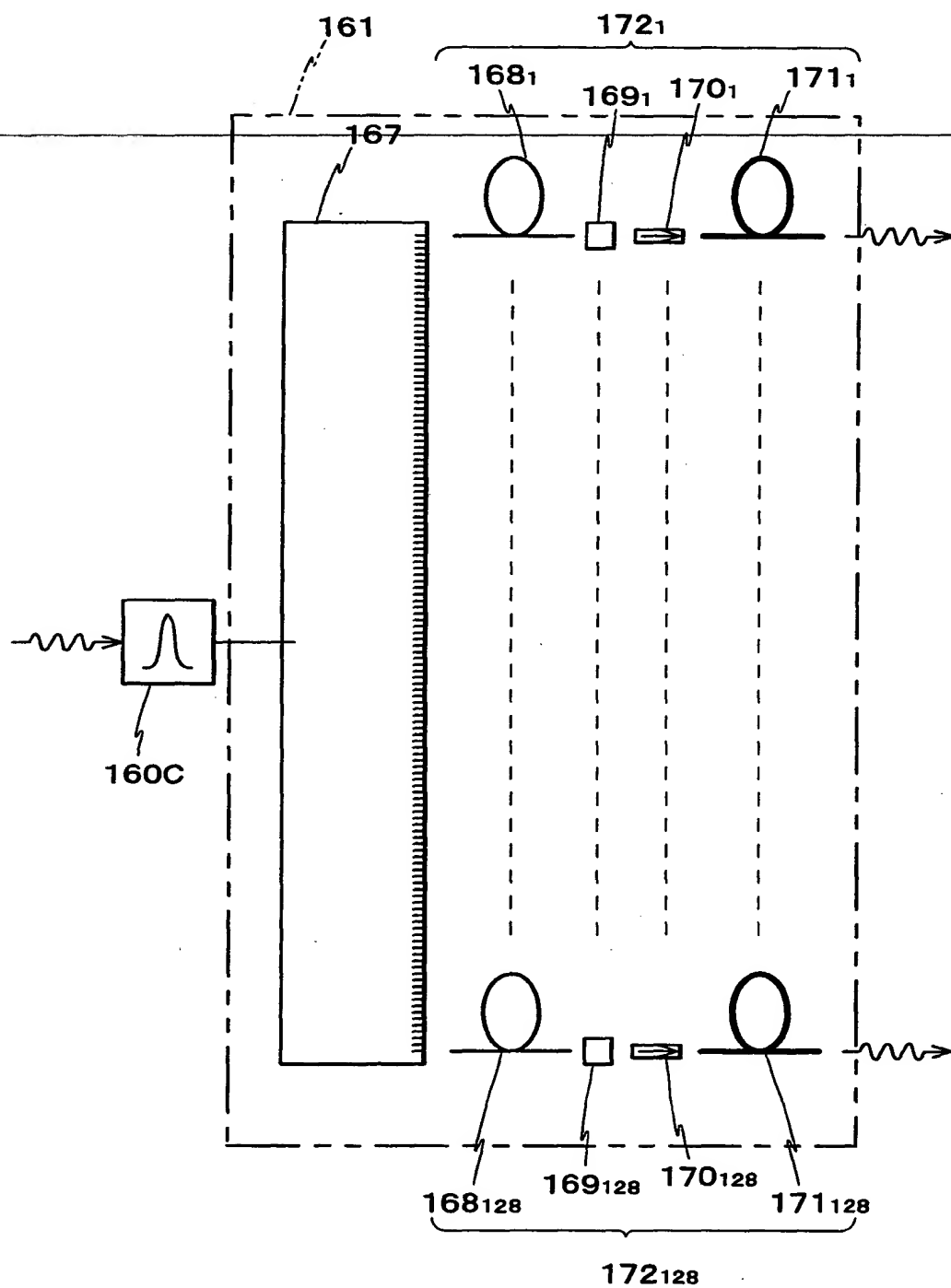


【図 2】

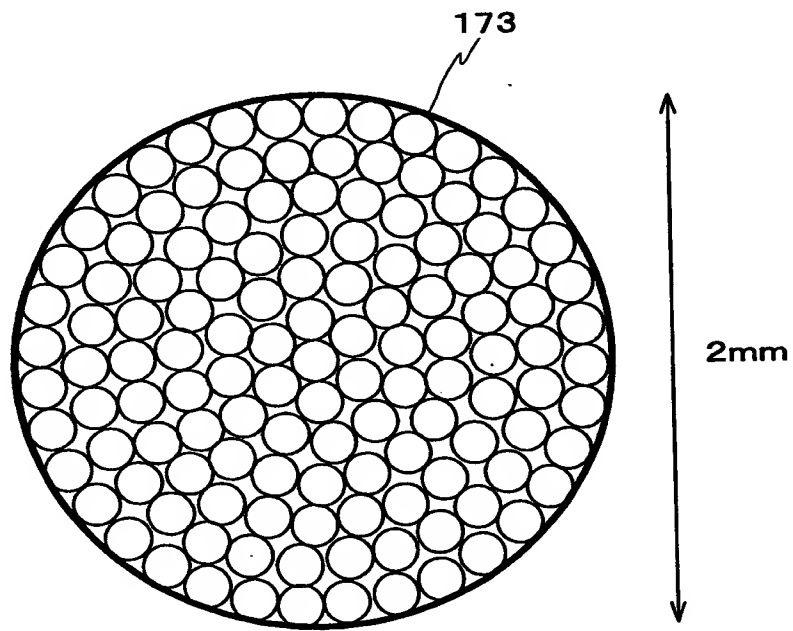




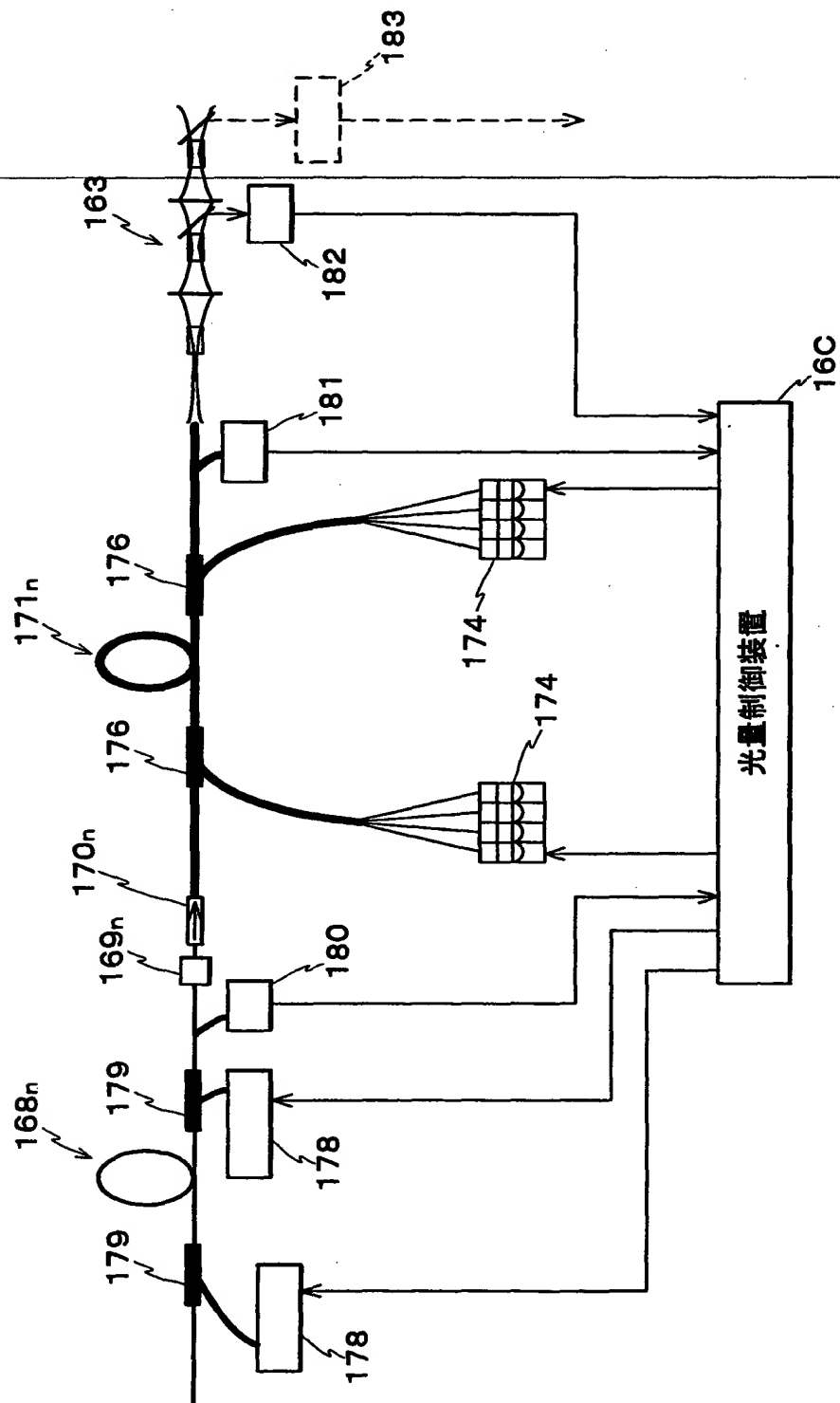
【図 3】



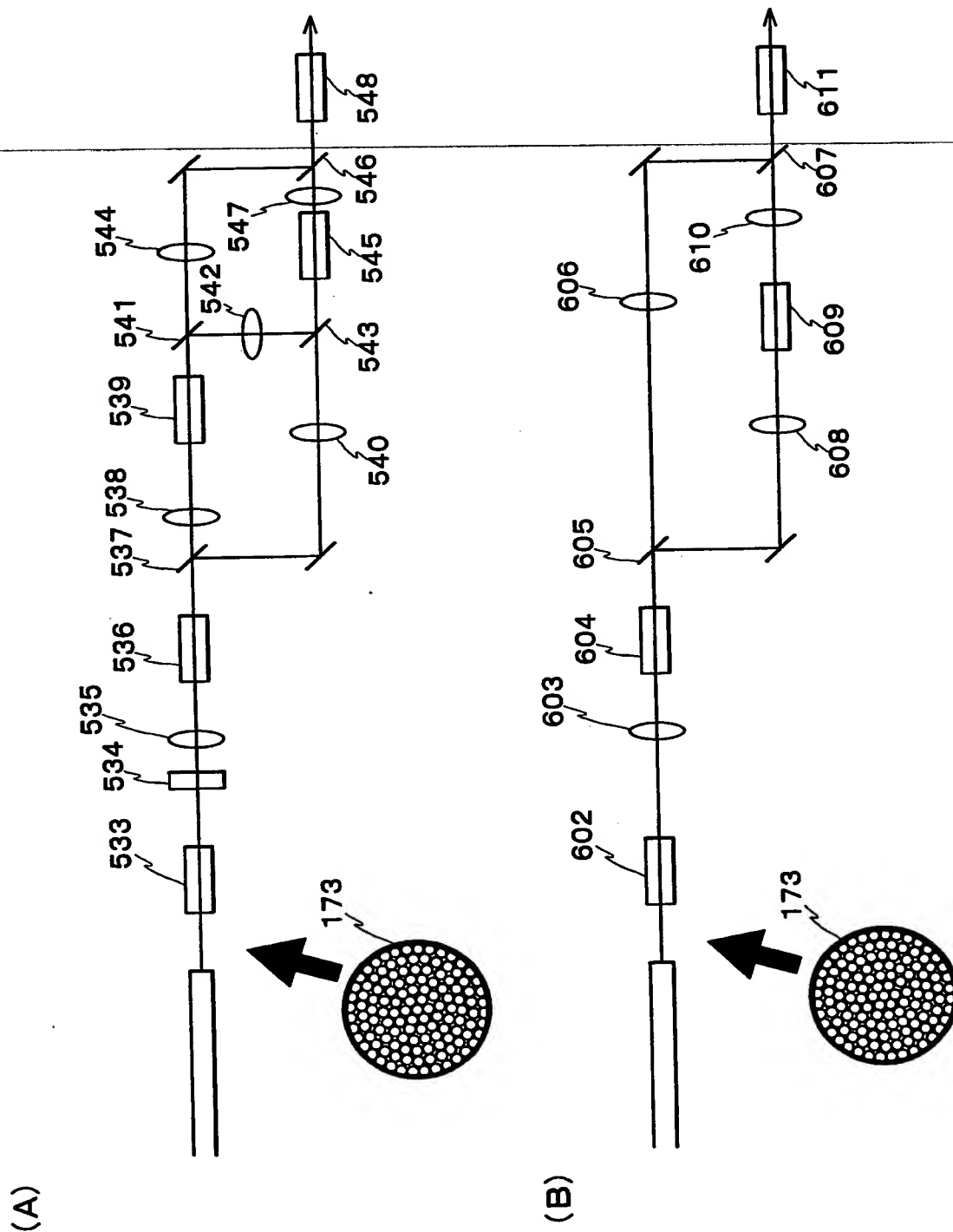
【図 4】



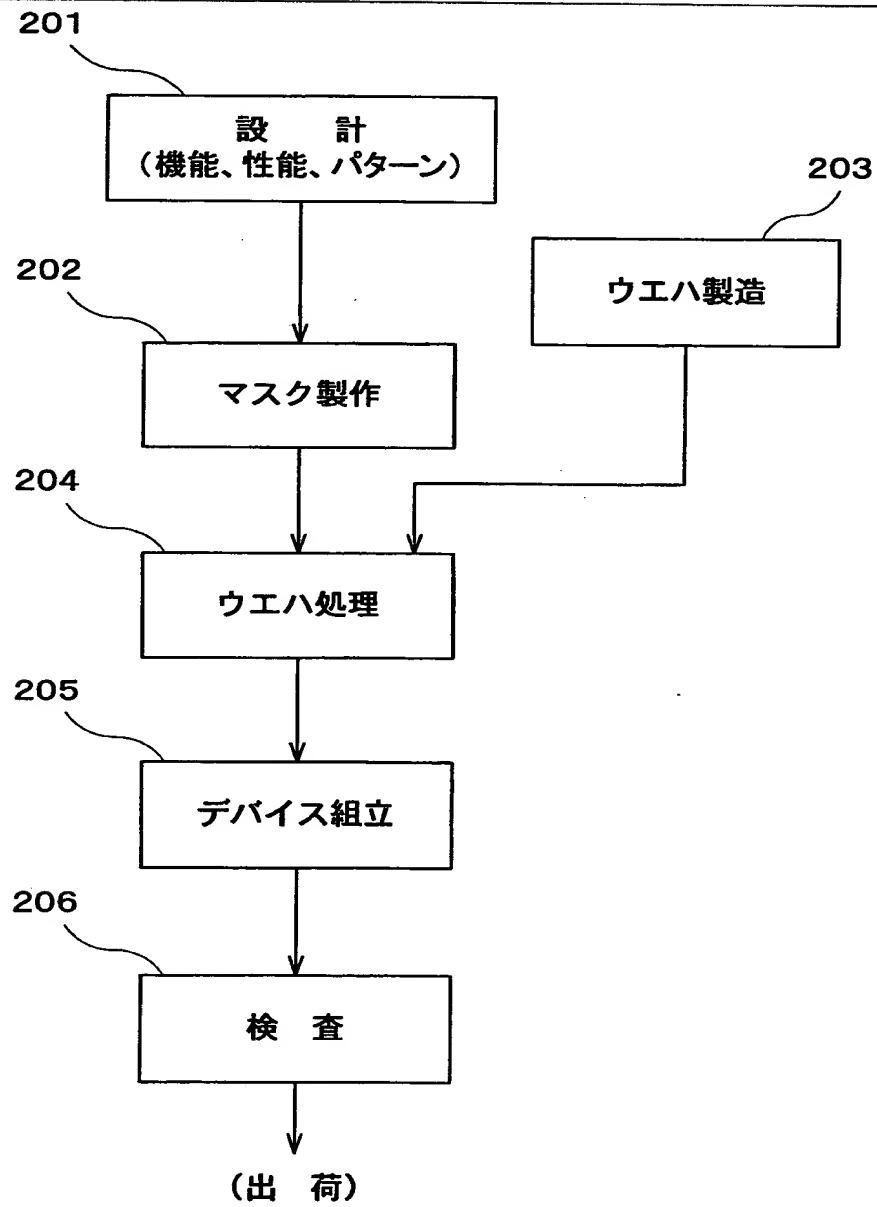
【图 5】



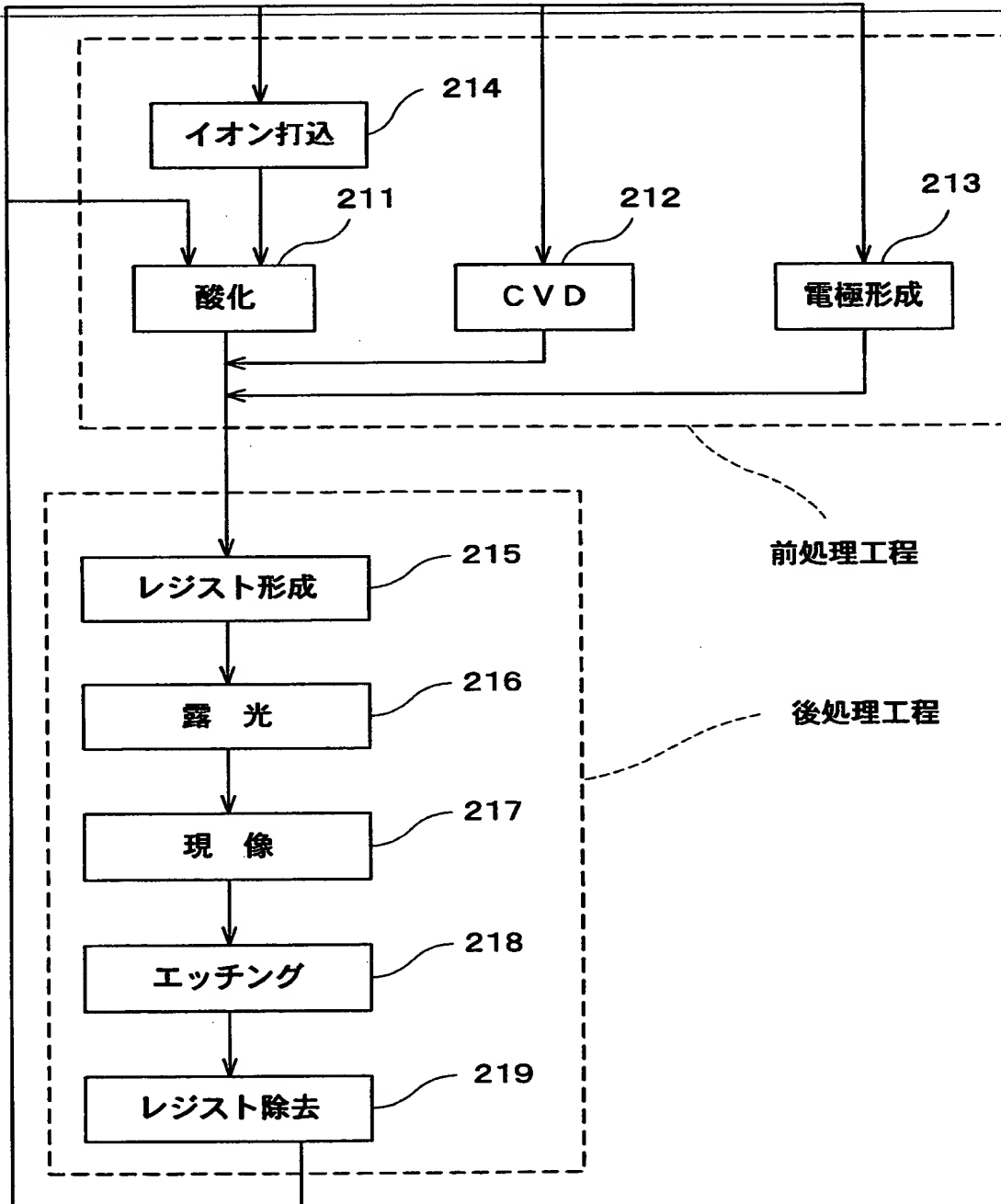
【図 6】



【図 7】



【図 8】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 制御に必要な要請に応じた光量制御を行うことができる光源装置を提供する。

【解決手段】 光源装置 1 6 は、単一波長発生光源 1 6 0 A と該光源からの光をパルス光に変換して出力する光変調器 1 6 0 C とを有する光発生部 1 6 0 と、光変調器からのパルス光を増幅するファイバアンプを各々有する光ファイバ群から成る光増幅部 1 6 1 と、光量制御装置 1 6 C とを備えている。光量制御装置 1 6 0 C は、光ファイバ群を構成する各ファイバの光出力の個別オン・オフによる段階的な光量制御と、光変調器の出力パルス光の周波数及びピークパワーの少なくとも一方を制御する光量制御とを行う。従って、段階的な光量制御に加えて、各段階間の光量の微調整が前記パルス光の周波数及びピークパワーの少なくとも一方の制御により可能になり、所定範囲内であれば如何なる設定光量にも光量を一致させることができる。

【選択図】 図 2

特平 11-257969

認定・付加情報

特許出願の番号	平成11年 特許願 第257969号
受付番号	59900886471
書類名	特許願
担当官	第五担当上席 0094
作成日	平成11年 9月14日

---

<認定情報・付加情報>

【提出日】 平成11年 9月10日

次頁無



出 願 人 履 歴 情 報

識別番号 [000004112]

---

1. 変更年月日	1990年 8月29日
[変更理由]	新規登録
住 所	東京都千代田区丸の内3丁目2番3号
氏 名	株式会社ニコン

